

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

И. П. ЖЕРЕБЦОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

**ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1982

ББК 31.211
Ж 59
УДК 621.3.011.7+621.3.013

Рецензент Г. А. Федотов

Жеребцов И. П.

Ж 59 Электрические и магнитные цепи: Основы электротехники. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1982. — 216 с., ил.

95 к.

В книге в популярной форме изложены основы устройства и работы электрических и магнитных цепей, применяемых в радиоэлектронике. Рассмотрены электрические цепи постоянного и переменного тока, их важнейшие элементы, электромагнитные явления и магнитные цепи.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: радиолюбителей, учащихся различных учебных заведений, слушателей народных университетов радиоэлектроники.

Ж $\frac{2302000000-084}{051(01)-82}$ 193—82.

ББК 31.211
6П2,1

Многие трудности, встречающиеся при изучении радиоэлектроники, в большинстве случаев возникают из-за недостаточного знания основ электротехники. В этой книге изложена элементарная электротехника в объеме, необходимом для последующего изучения основ радиоэлектроники. Рассмотрены цепи постоянного и переменного тока, электромагнитные явления, магнитные цепи, полупроводниковые выпрямители и электроизмерительные приборы.

Автор стремился рассмотреть возможно более полно основные вопросы электротехники, на которых базируется элементарная радиоэлектроника. Однако относительно небольшой объем книги не позволил включить в нее некоторые специальные разделы электротехники, с которыми в радиотехнической практике приходится встречаться сравнительно редко.

В книге приводятся единицы измерений в системе СИ, но указаны и некоторые единицы системы СГС, так как они могут встретиться читателю в книгах и журналах, выпущенных в прежние годы.

Поскольку строгие научные определения физических величин и их единиц слишком сложны и были бы непонятны многим читателям, в книге даны более простые объяснения сущности этих величин и их единиц измерений.

Автор выражает свою признательность за полезные замечания по книге канд. техн. наук Г. А. Федотову. Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 191041, Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Автор

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1. ЭЛЕКТРОНЫ, ИОНЫ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

Для изучения электрических цепей необходимо прежде всего вспомнить некоторые основные понятия из элементарного курса физики.

Как известно, все вещества состоят из весьма малых частиц, называемых молекулами. В свою очередь, молекулы состоят из атомов. Центральной частицей атома является ядро, имеющее *положительный электрический заряд*. Вокруг ядра вращаются *электроны*. Каждый электрон имеет наименьший известный нам *отрицательный электрический заряд*.

У *нейтральных* (незаряженных) атомов общий отрицательный заряд всех электронов равен положительному заряду ядра, т. е. оба заряда нейтрализуют друг друга.

Избыток электронов образует отрицательный электрический заряд и обозначается знаком минус ($-$). Недостаток электронов создает перевес положительного заряда, который обозначается знаком плюс ($+$).

Заряды одинаковых знаков, т. е. положительный и положительный или отрицательный и отрицательный, взаимно отталкиваются. Так, например, электроны всегда отталкиваются друг от друга. А заряды разных знаков, т. е. положительный и отрицательный, наоборот, взаимно притягиваются.

Электрический заряд, или количество электричества, обозначают буквой Q . Электрические заряды представляют собой избыток или недостаток огромного количества электронов. Единицей измерений электрического заряда, т. е. количества электричества, является *кулон* (Кл), названный в честь французского физика Ш. Кулона, впервые установившего количественный закон взаимодействия электрических зарядов.

Электрический заряд можно измерять числом электронов, но это неудобно, так как заряд электрона e очень мал и равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Отрицательный заряд в один кулон равен приблизительно $6,3 \cdot 10^{18}$ электронов. Положительный заряд в один кулон представляет собой недостаток такого же числа электронов. Некоторое представление об этом огромном числе дает следующий пример. Если от отрицательного заряда в один кулон каждую секунду отнимать по одному миллиону электронов, то потребуется 200 тысяч лет, чтобы исчерпать весь заряд.

Помимо электронов, важную роль в некоторых веществах играют *ионы*. Нейтральный атом, теряя или приобретая электроны, становится заряженным. Такой атом называется ионом. *Положительный и отрицательный ионы* имеют соответственно недостаток или избыток одного или нескольких электронов. В жидкостях и газах ионы являются подвижными частицами и определяют электрические свойства этих веществ.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Силы взаимного притяжения или отталкивания между электрическими зарядами передаются с помощью материальной среды, которая находится в особом напряженном состоянии и называется *электрическим полем*. Оно существует вокруг каждого электрического заряда и представляет собой форму материи. Если электрическое поле неизменно во времени, то его называют *электростатическим*.

Принято изображать электрическое поле с помощью так называемых *силовых линий*, показывающих направление действия электрических сил. Условились считать, что силовые линии показывают действие поля на элементарный положительный заряд. Иначе говоря, каждая силовая линия представляет собой путь, по которому под действием поля двигался бы элементарный положительный заряд, если бы он не имел массы, т. е. не обладал инерцией. Таким образом, *электрические силовые линии всегда направлены от положительного заряда к отрицательному*, как это изображено на рис. 1. Электрические силовые линии в большинстве случаев являются *разомкнутыми*: они начинаются на одном заряде и заканчиваются на другом.

Если в какой-то части поля силовые линии расположены гуще, то в этой части поле сильнее. Густота силовых линий характеризует *напряженность поля* или *силу поля*.

Поэтому силовые линии называют также *линиями напряженности*. Напряженность поля может быть определена как сила действия поля на единичный положительный заряд, например заряд в один кулон.

Поле называется *однородным*, если для всех его точек напряженность одна и та же. В *неоднородном* поле напря-

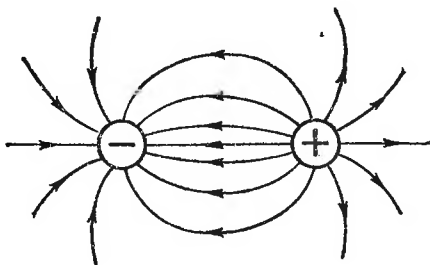


Рис. 1. Силовые линии электрического поля двух разноименных зарядов

женность в различных точках различна. Пример неоднородного поля показан на рис. 1.

Так как электрическое поле действует на электрические заряды и способно перемещать их, то очевидно, что оно обладает энергией. В соответствии с современными воззрениями считают, что энергия электрических зарядов сосредоточена в их электрическом поле.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

Для энергетической характеристики поля служит величина, называемая *электрическим потенциалом* или просто *потенциалом* и обозначаемая греческой буквой ϕ .

Понятие потенциала является очень важным, но одним из наиболее трудных для изучения. Рассмотрим его более подробно.

Когда под действием электрического поля перемещается какой-то электрический заряд, то на его перемещение расходуется энергия поля, т. е. поле совершает работу.

Потенциал данной точки поля ϕ есть отношение работы A , которую совершает поле, перемещая заряд Q из данной точки в бесконечно удаленную точку, к величине самого заряда:

$$\phi = A/Q.$$

Бесконечно удаленная точка взята в этом определении потому, что в ней уже нет поля и, следовательно, ее потенциал равен нулю. Обычно за нулевой потенциал принимают потенциал Земли.

Единицей электрического потенциала служит вольт (В или V), названный в честь итальянского ученого А. Вольта. Если в данной точке поля потенциал равен 1 В, то это значит, что при перемещении заряда, равного 1 Кл, из данной точки до земли поле совершает работу, равную 1 Дж. Напомним, что единицей измерений работы или энергии является 1 Дж (джоуль). Он равен работе силы в один ньютон на пути 1 м. А сила в 1 Н (ньютон) — это такая сила, которая массе 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 . Если при перемещении заряда, равного 2 Кл, из данной точки поля до земли поле совершило работу, равную 30 Дж, то потенциал этой точки поля равен: $\varphi = 30/2 = 15 \text{ В}$.

Из сказанного выше ясно, что в разных точках поля потенциал различен. Чем ближе данная точка поля к заряду, создавшему поле, тем выше ее потенциал. И, наоборот, чем дальше точка от заряда, создавшего поле, тем меньше значение потенциала в этой точке. А так как поле может быть создано положительным или отрицательным зарядом, то соответственно и потенциал будет считаться положительным или отрицательным.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.

ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электронов или ионов. Вещества, в которых может быть получен электрический ток в виде перемещения огромных «армий» электронов или ионов, называют проводниками. К ним относятся металлы, уголь, растворы солей, кислот и щелочей, живые организмы, а также все влажные предметы. Другие вещества, в которых электроны или ионы могут перемещаться лишь в ничтожно малых количествах, называются *диэлектриками* или *изоляторами*. Диэлектриками являются воздух и другие газы (при некоторых условиях в газах может протекать электрический ток), стекло, фарфор, резина, пластмассы, различные смолы и маслянистые жидкости, сухое дерево, сухая бумага, сухая ткань и многие другие вещества. Ток в диэлектриках (*ток утечки*) настолько мал, что в большинстве случаев его не учитывают.

Имеются также вещества, называемые *полупроводниками*, они занимают среднее положение между проводниками и диэлектриками. Полупроводники обладают особыми свойствами и широко используются в современной радиоэлектронике. К полупроводникам относятся углерод, фосфор, бор, германий, кремний, сера, селен, закись меди и очень многие другие простые и сложные вещества.

В твердых проводниках электрический ток представляет собой направленное движение электронов.

Электроны всегда двигаются от того места, где они имеются в избытке, т. е. от минуса, туда, где имеется их недостаток, т. е. к плюсу. Но в электротехнике принято условно считать, что *ток идет от плюса к минусу*. Такое направление тока было установлено еще до открытия электронов. Переход к истинному направлению движения электронов представляет значительные трудности, так как для этого потребовалось бы переделать все книги, учебники и учебные пособия по электротехнике и радиотехнике.

Ток возникает под влиянием электрического поля, которое, действуя на электроны, приводит их в движение. Электрическое поле обладает свойством распространяться вдоль провода с огромной скоростью, близкой к скорости света, т. е. 300 000 км/с. Поэтому такое же большое значение имеет *скорость распространения тока в проводе*. Когда на одном конце провода под действием электрического поля возникает ток, то почти мгновенно на другом конце провода также пойдет ток. Но электроны, которые пришли в движение у начала провода, очень нескоро дойдут до его конца. Скорость перемещения электронов в проводнике весьма мала и измеряется лишь долями миллиметра в секунду.

Ток в проводнике напоминает движение воды в длинной трубе, наполненной водой, к одному концу которой присоединен насос. Если накачивать насосом воду в трубу, то давление весьма быстро передается вдоль трубы от одних частиц воды к другим и из открытого конца трубы потечет вода. Однако вода, добавленная насосом, двигается гораздо медленнее, чем передается давление, и дойдет до конца трубы через значительный промежуток времени.

В жидкостях электрический ток, в отличие от твердых проводников, всегда представляет собой движение положительных и отрицательных ионов в противоположных направлениях.

Электрический ток в газах является перемещением электронов и положительных ионов также навстречу друг другу. В некоторых случаях в газах могут двигаться и отрицательные ионы, а в вакууме, т. е. в сильно разреженном газе, электрический ток представляет собой поток электронов, летящих свободно с большой скоростью, без столкновений с частицами газа.

В дальнейшем будем рассматривать ток в твердых телах.

5. СИЛА ТОКА И ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

Электрический ток с количественной стороны характеризуют *силой тока*. На практике вместо слов «сила тока» говорят просто ток.

Сила тока — это число электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение провода за одну секунду.

Чем больше электронов проходит в одну секунду через поперечное сечение провода, тем больше ток. Ток обозначают буквой I или i и измеряют в *амперах* (единица тока названа в честь французского ученого А. Ампера). Когда ток равен одному амперу, то это значит, что в одну секунду через поперечное сечение провода проходит один кулон электричества, т. е. $6,3 \cdot 10^{18}$ электронов.

Если за время t через поперечное сечение провода прошло равномерным потоком количество электричества Q , то сила тока

$$I = Q/t.$$

Отсюда следует, что количество электричества определяется произведением тока на время:

$$Q = It.$$

Для обычных осветительных ламп мощностью в несколько десятков ватт ток составляет десятые доли ампера. В электронагревательных приборах ток равен нескольким амперам, а в проводах мощных электрических линий он может достигать тысяч ампер. Однако во многих случаях, особенно в радиоаппаратуре, ток значительно меньше одного ампера. Поэтому часто применяют более мелкие единицы тока — *миллиампер*, равный тысячной доле, и *микроампер*, равный миллионной доле ампера. Сокращенно ампер обозначают буквой А, миллиампер — мА и микроампер мкА. Ампер, миллиампер и микроампер обозначают по международной системе А, mA и μA .

Для измерения тока применяются *амперметры*. Их изображение на электрических схемах представлено на рис. 2, в. Приборы, предназначенные для измерения небольших токов, имеют шкалу, проградуированную в миллиамперах (мА) или в микроамперах (μА) и называются миллиамперметрами или микроамперметрами.

Если нужно измерить ток в каком-либо проводе (рис. 2, а), то надо разорвать провод (рис. 2, б) и в место разрыва включить амперметр или миллиамперметр, как показано на рис. 2, в (такое включение называется *последовательным*). Тогда ток пройдет через прибор и будет измерен.

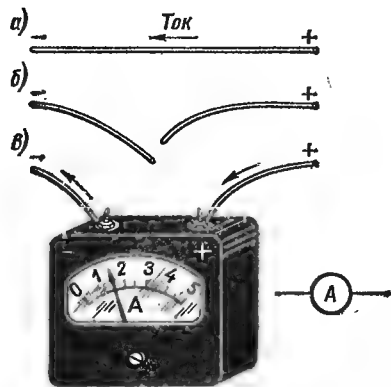


Рис. 2. Включение амперметра и его изображение на схемах

Включенный прибор должен быть рассчитан на ток, заведомо больший, чем измеряемый. Нельзя, например, включать миллиамперметр на 250 мА для измерения тока в несколько ампер, так как прибор будет испорчен.

У многих приборов зажимы для включения имеют знаки «+» и «—» или один из них, и тогда включение нужно делать в соответствии с этими знаками, т. е. плюсовой зажим соединять с плюсом источника тока, а минусовой с минусом. Иначе говоря, направление тока в амперметре должно быть от зажима «+» к зажиму «—» (рис. 2, в). Несоблюдение этого правила вызовет отклонение стрелки прибора в противоположную сторону, в результате чего она может погнуться.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

Основной величиной, характеризующей электрические явления, служит также *электрическое напряжение*, или просто *напряжение*, обозначаемое буквой U или u . Для того чтобы в проводнике возник электрический ток, необходимо иметь на концах этого проводника различные электрические потенциалы. Напряжение характеризует

именно эту разность потенциалов на концах проводника. Можно сказать, что напряжение является причиной возникновения электрического тока. Ток будет протекать в проводнике тогда, когда между концами проводника есть напряжение.

Подобно этому, газ или жидкость передвигается всегда из места с более высоким давлением в место с более низким давлением, т. е. в том случае, если имеется разница давлений.

Для измерения напряжения служит известная уже нам единица *вольт*. Кроме того, применяются: *милливольт* (мВ), т. е. тысячная доля вольта и *микровольт* (мкВ), или миллионная доля вольта, а также *киловольт* (кВ), равный 1000 В, и *мегавольт* (МВ), равный 10^6 В. В международной системе вольт, милливольт, микровольт, киловольт и мегавольт обозначают соответственно V , mV , μV , kV и MV .

В осветительной электросети напряжение составляет 127 или 220 В, а в линиях высокого напряжения оно достигает сотен киловольт. В антенне радиоприемника под действием радиоволн какой-либо далекой радиостанции создается напряжение, измеряемое несколькими микровольтами или долями микровольта.

Напряжение измеряют с помощью приборов, называемых *вольтметрами* (рис. 3).

При включении вольтметра цепь не разрывается, его подключают к тем двум точкам, между которыми необходимо измерить напряжение. На рис. 3 показано включение вольтметра для измерения напряжения между точками *А* и *Б* проводника, по которому протекает ток. Такое включение называют включением вольтметра *параллельно* участку *АБ* проводника.

При включении вольтметра надо соблюдать те же предосторожности, какие были указаны для амперметра. Нельзя, например, вольтметр со шкалой на 10 В включать для измерения неизвестного напряжения, которое может оказаться больше и испортит прибор. Следует также соблюдать правильную полярность включения.

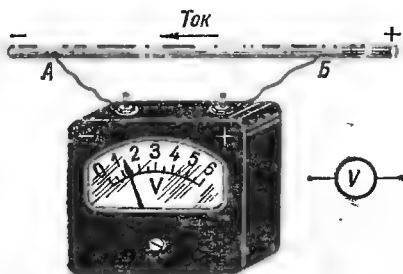


Рис. 3. Включение вольтметра и его изображение на схемах

7. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Для практических целей необходим постоянный ток, имеющий неизменное значение и протекающий в одном направлении в течение любого времени. Чтобы получить такой непрерывный электрический ток, нужно иметь постоянное напряжение. Его создают так называемые *генераторы* или *источники электродвижущей силы*.

Электродвижущая сила (ЭДС) является причиной, вызывающей движение электрических зарядов. Она определяется энергией, затрачиваемой на перемещение единичного электрического заряда (заряда в один кулон) вдоль всей замкнутой электрической цепи.

Вместе с тем, электродвижущая сила характеризует разность потенциалов, т. е. разность электрических состояний, созданную источником ЭДС. Как видно, понятия ЭДС и напряжения тесно связаны друг с другом. Если на участке *АВ* некоторого проводника (рис. 3) имеется разность потенциалов и за счет нее возникает ток, то мы говорим, что на этом участке действует напряжение. А ток во всей замкнутой электрической цепи создается за счет действия электродвижущей силы. В дальнейшем мы уточним различие между понятиями ЭДС и напряжения. ЭДС обозначают буквой *E* или *e*. Единицами для измерения ЭДС служат те же единицы, что и для напряжения.

Следует иметь в виду, что ЭДС всегда создается теми или иными неэлектрическими силами или, как говорят, *сторонними силами*, не являющимися силами электрического поля. Например, в гальванических элементах ЭДС создается за счет химических реакций.

Работу электрического генератора в некоторой степени можно сравнить с работой насоса, который создает давление и обеспечивает непрерывное движение газа или воды в трубе. В качестве источников ЭДС служат гальванические элементы, аккумуляторы, выпрямители, а также некоторые другие устройства. Все они иначе называются *источниками тока*, или *источниками питания*, или *источниками электрической энергии*.

8. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭДС

Для питания радиоаппаратуры часто применяют гальванические элементы и батареи. Каждый гальванический элемент имеет два электрода, обычно угольный и цинковый.

Эти электроды находятся в растворе химического вещества, называемого электролитом. За счет химической реакции, происходящей в элементе, на одном электроде возникает избыток электронов, а на другом — недостаток электронов. Таким образом, химическая реакция создает постоянную ЭДС на полюсах элемента. Отрицательный полюс в элементах всегда получается на цинковом, а положительный полюс на угольном электроде (в некоторых элементах на медном).

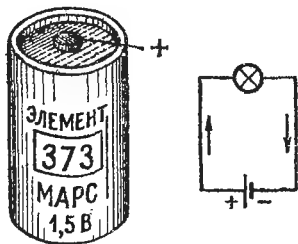


Рис. 4. Сухой элемент и электрическая цепь, составленная из элемента и лампы

Наибольшее распространение получили сухие элементы. Они имеют цинковый электрод в виде сосуда, внутри которого находится угольный электрод, окруженный смесью угольного порошка с химическим веществом — перекисью марганца. В качестве электролита используется киселеобразная масса, сделанная из раствора нашатыря. Сверху элемент залит смолой, через которую выведены наружу проводники от электродов. На рис. 4

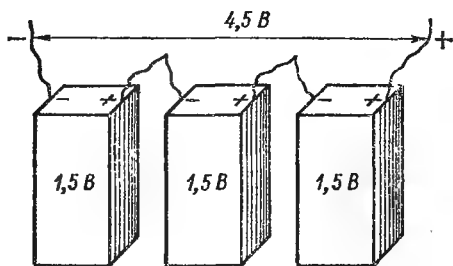


Рис. 5. Последовательное соединение элементов в батарею

показан внешний вид сухого элемента и его изображение на схемах.

ЭДС сухого элемента составляет примерно 1,5 В. Ток, который можно получить от одного элемента, тем больше, чем больше размеры элемента. Применяющиеся на практике элементы могут давать ток до десятков или сотен миллиампер. Для увеличения ЭДС применяют батарею с последовательным соединением элементов. В этом случае плюс одно-

го элемента соединяют с минусом второго элемента, плюс второго элемента — с минусом третьего и т. д. (рис. 5). Минус первого элемента и плюс последнего являются полюсами всей батареи.

Батарею из последовательно соединенных элементов изображают на схемах, не показывая соединительные провода между отдельными элементами. Если число элементов в батарее велико, то вычерчивают только первый и последний элементы, а между ними проводят штриховую линию, обозначающую пропущенные элементы (рис. 6).



Рис. 6. Изображение на схемах последовательного соединения элементов

При последовательном соединении элементов ЭДС возрастает во столько раз, сколько взято элементов. Например, если соединены три элемента, каждый из которых имеет ЭДС, равную 1,5 В, то ЭДС всей батареи составит 4,5 В.

Недостатком гальванических элементов является небольшой срок их службы (примерно несколько месяцев), после чего они приходят в негодность.

Помимо гальванических элементов, применение получили аккумуляторы, изображаемые на схемах так же, как и элементы. Аккумуляторы необходимо заряжать от других источников постоянного тока.

Важное преимущество аккумуляторов состоит в том, что они способны давать больший ток, чем гальванические элементы. Кроме того, когда аккумулятор разрядится, его снова заряжают током. Разряд и заряд можно повторить много раз, и поэтому срок службы аккумуляторов при правильном обращении с ними составляет несколько лет.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

9. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Если соединить проводниками полюсы источника ЭДС с тем прибором, который должен питаться током, например с лампой накаливания, то получается простейшая замкнутая электрическая цепь (см. рис. 4). Пока источник ЭДС

работает (например, пока в гальваническом элементе происходит химическая реакция), в цепи действует ЭДС и протекает ток. Если электрическую цепь разорвать в каком-либо месте, т. е. разомкнуть ее, ток прекратится, но ЭДС будет существовать и в разомкнутой цепи.

Для того чтобы непрерывно протекал ток, кроме электродвижущей силы, необходимо еще наличие замкнутой электрической цепи.

В каждой замкнутой цепи различают внутреннюю часть, т. е. источник ЭДС, и *внешнюю часть*, к которой относятся все приборы и провода, подключенные к источнику ЭДС.

Поток электронов в замкнутой цепи движется от минуса источника через внешнюю цепь, например через лампу, к плюсу источника, а внутри источника — от плюса к минусу. Условно считают, что ток во внешней цепи идет от плюса к минусу, т. е. в направлении, противоположном истинному движению электронов.

При изучении более сложных схем следует помнить, что в любой замкнутой цепи ток непременно проходит через источник ЭДС.

Рассматривая цепь постоянного или переменного тока в какой-либо сложной схеме, надо всегда иметь в виду, что в состав цепи обязательно входит источник ЭДС, создающий данный ток. В замкнутой цепи без источника ЭДС ток не может протекать, так как именно источник ЭДС придает электронам энергию, необходимую для их движения по проводам цепи.

Нужно также хорошо усвоить разницу между ЭДС и током. ЭДС, создающая разность потенциалов между полюсами источника тока, существует независимо от того, замкнута цепь или разомкнута, есть ли ток или его нет. А ток может быть только при условии, что цепь замкнута. ЭДС есть причина, вызывающая появление тока, а ток характеризует само движение электронов. Подобно этому, если в водопроводной системе все краны закрыты, то движения воды нет, хотя давление или напор воды существует. Но стоит открыть кран, как под действием давления начнется движение воды и в трубах образуется водяной поток.

Если в разные части электрической цепи, состоящей, например, из элемента, замкнутого на лампу, включить амперметры, то каждый из них покажет одинаковый ток. Эта цепь характерна тем, что все приборы в ней, т. е. лампа,

элемент, амперметры, включены друг за другом. Ток проходит все приборы или все участки цепи последовательно один за другим. Подобная цепь является *последовательной цепью*, а включение приборов в ней называют *последовательным соединением*.

В последовательной цепи ток везде одинаков. Этот закон является очень важным. Многие часто допускают ошибку, считая, что ток, выходя из одного полюса источника, постепенно уменьшается вдоль своего пути и к другому полюсу приходит более слабым. Но это означало бы, что часть электронов где-то задерживается и накапливается, чего, конечно, нет.

Закон постоянства тока в отдельных участках последовательной цепи остается в силе при любом числе включенных приборов. Надо иметь в виду, что источник ЭДС всегда соединен последовательно с внешней частью цепи. Поэтому ток внутри источника будет таким же, как и во внешней цепи. Иначе говоря, *через генератор всегда проходит полный ток, потребляемый внешней цепью*.

10. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Различные вещества неодинаково проводят электрический ток и поэтому разделяются на проводники, полупроводники и диэлектрики. Влияние вещества, в котором протекает ток, на значение тока учитывается с помощью *электрического сопротивления*, называемого обычно просто *сопротивлением*. Оно зависит от размеров проводника, температуры и его материала. Упрощенно сопротивление можно представить так: свободные электроны, движущиеся вдоль проводника, сталкиваются с атомами, молекулами и другими электронами самого проводника, при этом скорость движения электронов уменьшается, но под действием электрического поля она вновь увеличивается. И в результате проводник нагревается.

В радиоэлектронной аппаратуре для создания того или иного сопротивления широко применяются резисторы. Они представляют собой важные элементы электрических цепей.

Чем длиннее провод и чем меньше площадь его поперечного сечения, тем больше его сопротивление. Наименьшим сопротивлением обладают серебро и медь. Если необходимо создать большое сопротивление, то используют провода из специальных сплавов, имеющих высокое сопротивление. К ним относятся никелин, константан, манганин, нихром

и др. Эти сплавы иногда называют реостатными, так как провода из них применяются для изготовления *реостатов* — резисторов, служащих для регулировки тока в цепи.

Единицей измерений сопротивления служит ом (Ом), названный в честь немецкого ученого Г. Ома. Применяются также единицы *килоом* (кОм), равный тысяче ом, и *мегаом* (МОм), равный миллиону ом. На резисторах ом, килоом и мегаом обозначают соответственно Ω , $k\Omega$ и $M\Omega$. Сопротивлением в один ом обладает медная проволока длиной один метр и диаметром 0,15 мм. У медных соединительных проводов сопротивление составляет малые доли ома.

Электронагревательные приборы имеют сопротивление порядка десятков ом, нити различных электроламп обла-

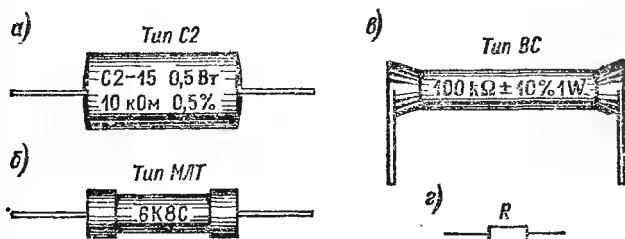


Рис. 7. Внешний вид некоторых резисторов и их изображение на схемах

дают сопротивлением от десятков до сотен ом, диэлектрики — сотни и тысячи мегаом. В радиоаппаратуре используются различные резисторы с сопротивлением от нескольких ом до нескольких мегаом. На рис. 7 показан внешний вид некоторых резисторов (рис. 7, а, б, в), применяемых в радиоаппаратуре, а также дано условное изображение их на схемах (рис. 7, г). Сопротивление обозначается буквой R или r .

В некоторых случаях пользуются величиной, обратной сопротивлению. Она называется проводимостью и обозначается буквой G или g . Таким образом, можно написать:

$$G = 1/R \text{ и } R = 1/G.$$

Проводимость и сопротивление обратно пропорциональны друг другу. Чем больше сопротивление, тем меньше проводимость, и наоборот. Единицей проводимости является

сименс (См), названный в честь немецкого ученого Э. В. Сименса. Один *сименс* — это проводимость электрической цепи, имеющей сопротивление в один ом.

Применяются также такие единицы измерений, как *миллисименс* (мСм) и *микросименс* (мкСм).

11. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ

На практике нередко приходится рассчитывать сопротивление различных проводов. Это можно сделать с помощью формул или по данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Диаметр провода, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Сопротивление 1 м провода, Ом				Допустимый ток, А, при плотности тока, равной 3 А/мм ²
		Медь	Никелии и манганин	Константан	Нихром	
0,05	0,002	8,90	212,00	245,00	510,00	0,006
0,08	0,005	3,50	82,50	95,40	199,00	0,015
0,10	0,0079	2,20	53,00	61,10	127,00	0,025
0,12	0,011	1,60	37,60	42,60	88,50	0,033
0,15	0,018	1,00	23,50	27,20	56,50	0,052
0,20	0,031	0,55	13,20	15,30	31,90	0,094
0,25	0,049	0,36	8,45	9,78	20,40	0,147
0,30	0,070	0,25	5,36	6,80	14,20	0,21
0,40	0,126	0,14	3,30	3,80	7,94	0,38
0,50	0,196	0,09	2,12	2,45	5,10	0,6
0,60	0,283	0,06	1,45	1,69	3,54	0,86
0,70	0,385	0,045	1,08	1,25	2,60	1,16
0,80	0,50	0,035	0,825	0,954	1,99	1,5
1,00	0,79	0,023	0,530	0,611	1,27	2,5

Примечание. 1. Данные для проводов, не указанных в таблице, надо брать как некоторые средние значения. Например, для провода из никелина диаметром 0,18 мм можно приблизительно считать, что площадь сечения равна 0,025 мм², сопротивление одного метра 18 Ом, а допустимый ток равен 0,075 А. 2. Для другого значения плотности тока данные последнего столбца нужно соответственно изменить; например, при плотности тока, равной 6 А/мм², их следует увеличить в два раза.

Влияние материала проводника учитывается с помощью удельного сопротивления, обозначаемого греческой буквой ρ и представляющего собой сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм². Наименьшим удельным сопротивлением $\rho = 0,016 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ обла-

дает серебро. Приведем среднее значение удельного сопротивления некоторых проводников:

Серебро	0,016	Свинец	0,21
Медь	0,017	Никелин	0,42
Алюминий	0,026	Манганин	0,42
Вольфрам	0,055	Константан	0,5
Цинк	0,06	Ртуть	0,96
Латунь	0,07	Нихром	1,05
Сталь	0,1	Фехраль	1,2
Бронза фосфористая . . .	0,11	Хромаль	1,45

При различных количествах примесей и при разном соотношении компонентов, входящих в состав реостатных сплавов, удельное сопротивление может несколько измениться.

Сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = \rho l / s,$$

где R — сопротивление, Ом; ρ — удельное сопротивление, (Ом·мм²)/м; l — длина провода, м; s — площадь сечения провода, мм². Если известен диаметр провода d , то площадь его сечения равна:

$$s = \pi d^2 / 4 \text{ или } s = 0,78 d^2 \approx 0,8 d^2.$$

Измерить диаметр провода лучше всего с помощью микрометра, но если его нет, то следует намотать плотно 10 или 20 витков провода на карандаш и измерить линейкой длину намотки. Разделив длину намотки на число витков, найдем диаметр провода.

Для определения длины провода известного диаметра из данного материала, необходимой для получения нужного сопротивления, пользуются формулой

$$l = sR / \rho.$$

Пример 1. Найти сопротивление 30 м медного провода диаметром 0,1 мм.

Решение. Определяем по табл. 1 сопротивление 1 м медного провода, оно равно 2,2 Ом. Следовательно, сопротивление 30 м провода будет $R = 30 \cdot 2,2 = 66$ Ом.

Расчет по формулам дает следующие результаты: площадь сечения провода: $s = 0,78 \cdot 0,1^2 = 0,0078$ мм². Так как удельное сопротивление меди $\rho = 0,017$ (Ом·мм²)/м, то получим $R = 0,017 \cdot 30 / 0,0078 \approx 65,5$ Ом.

Пример 2. Сколько никелинового провода диаметром 0,5 мм нужно для изготовления реостата, имеющего сопротивление 40 Ом?

Решение. По табл. 1 определяем сопротивление 1 м этого провода: $R = 2,12$ Ом. Поэтому, чтобы изготовить реостат сопротивлением 40 Ом, нужен провод, длина которого $l = 40/2,12 \approx 18,9$ м.

Проведем тот же расчет по формулам. Находим площадь сечения провода $s = 0,78 \cdot 0,5^2 = 0,195$ мм². А длина провода будет $l = 0,195 \cdot 40/0,42 \approx 18,6$ м.

12. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Основным законом электротехники, при помощи которого можно изучать и рассчитывать электрические цепи, является закон Ома, устанавливающий соотношение между током, напряжением и сопротивлением. Необходимо отчетливо понимать его сущность и уметь правильно пользоваться им при решении практических задач. Часто в электротехнике и радиотехнике допускаются ошибки из-за неумения правильно применить закон Ома.

Закон Ома для участка цепи гласит: ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению.

Если увеличить в несколько раз напряжение, действующее в электрической цепи, то ток в этой цепи увеличится во столько же раз. А если увеличить в несколько раз сопротивление цепи, то ток во столько же раз уменьшится. Подобно этому водяной поток в трубе тем больше, чем сильнее давление и чем меньше сопротивление, которое оказывает труба движению воды.

Чтобы выразить закон Ома математически наиболее просто, считают, что сопротивление проводника, в котором при напряжении 1 В проходит ток 1 А, равно 1 Ом.

Ток в амперах можно всегда определить, если разделить напряжение в вольтах на сопротивление в омах. Поэтому закон записывается следующей формулой:

$$I = U/R.$$

Расчеты, выполняемые с помощью закона Ома, будут правильны в том случае, когда напряжение выражено в вольтах, сопротивление в омах и ток в амперах. Если используются кратные единицы измерений этих величин (например, миллиампер, милливольт, мегаом и т. д.); то их следует перевести соответственно в амперы, вольты и омы. Чтобы подчеркнуть это, иногда формулу закона Ома пишут так:

$$\text{ампер} = \frac{\text{вольт}}{\text{ом}}.$$

Можно также рассчитывать ток в миллиамперах и микроамперах, при этом напряжение должно быть выражено в вольтах, а сопротивление — в килоомах и мегаомах соответственно.

Закон Ома справедлив для любого участка цепи. Если требуется определить ток в данном участке цепи, то необходимо напряжение, действующее на этом участке (рис. 8), разделить на сопротивление именно этого участка.

Приведем пример расчета тока по закону Ома. Пусть требуется определить ток в лампе, имеющей сопротивление 2,5 Ом, если напряжение, приложенное к лампе, составляет 5 В. Разделив 5 В на 2,5 Ом, получим значение тока, равное 2 А. Во втором примере определим ток, который будет протекать под действием напряжения 500 В в цепи, сопротивление которой равно 0,5 МОм. Для этого выразим сопротивление в омах; разделив 500 В на 500 000 Ом, найдем значение тока в цепи, которое равно 0,001 А или 1 мА.

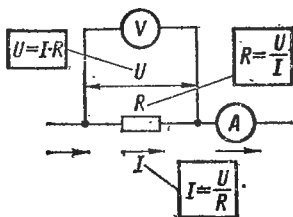


Рис 8. Применение закона Ома для участка цепи

Часто, зная ток и сопротивление, определяют с помощью закона Ома напряжение. Запишем формулу для определения напряжения

$$U = IR.$$

Из этой формулы видно, что напряжение на концах данного участка цепи прямо пропорционально току и сопротивлению. Смысл этой зависимости понять нетрудно. Если не изменять сопротивление участка цепи, то увеличить ток можно только путем увеличения напряжения. Значит при постоянном сопротивлении большему току соответствует большее напряжение. Если же надо получить один и тот же ток при различных сопротивлениях, то при большем сопротивлении должно быть соответственно большее напряжение.

Напряжение на участке цепи часто называют *падением напряжения*. Это нередко приводит к недоразумению. Многие думают, что падение напряжения есть какое-то потерянное ненужное напряжение. В действительности же понятия напряжение и падение напряжения равнозначны.

Расчет напряжения с помощью закона Ома можно показать на следующем примере. Пусть через участок цепи с сопротивлением 10 кОм проходит ток 5 мА и требуется определить напряжение на этом участке.

Умножив $I = 0,005$ А на $R = 10\,000$ Ом, получим напряжение, равное 50 В. Можно было бы получить тот же результат, умножив 5 мА на 10 кОм: $U = 5 \cdot 10 = 50$ В.

В радиоэлектронных устройствах ток обычно выражается в миллиамперах, а сопротивление — в килоомах. Поэтому удобно в расчетах по закону Ома применять именно эти единицы измерений.

По закону Ома рассчитывается также сопротивление, если известно напряжение и ток. Формула для этого случая пишется следующим образом:

$$R = U/I.$$

Сопротивление всегда представляет собой отношение напряжения к току. Если напряжение увеличить или уменьшить в несколько раз, то ток увеличится или уменьшится в такое же число раз. Отношение напряжения к току, равное сопротивлению, остается неизменным.

Не следует понимать формулу для определения сопротивления в том смысле, что сопротивление данного проводника зависит от тока и напряжения. Известно, что оно зависит от длины, площади сечения и материала проводника. По внешнему виду формула для определения сопротивления напоминает формулу для расчета тока, но между ними имеется принципиальная разница. Ток в данном участке цепи действительно зависит от напряжения и сопротивления и изменяется при их изменении. А сопротивление данного участка цепи является величиной постоянной, не зависящей от изменения напряжения и тока, но равной отношению этих величин.

Когда один и тот же ток проходит в двух участках цепи, а напряжения, приложенные к ним, различны, то ясно, что участок, к которому приложено большее напряжение, имеет соответственно большее сопротивление. А если под действием одного и того же напряжения в двух разных участках цепи проходит различный ток, то меньший ток всегда будет на том участке, который имеет большее сопротивление. Все это вытекает из основной формулировки закона Ома, т. е. из того, что ток тем больше, чем больше напряжение и чем меньше сопротивление.

Расчет сопротивления с помощью закона Ома покажем на следующем примере. Пусть требуется найти сопротивление участка, через который при напряжении 40 В проходит ток 50 мА. Выразив ток в амперах, получим $I = 0,05$ А. Разделим 40 на 0,05 и найдем, что сопротивление составляет 800 Ом.

Закон Ома можно наглядно представить в виде так называемой *вольт-амперной характеристики*. Как известно, прямая пропорциональная зависимость между двумя величинами представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. Такую зависимость принято называть *линейной*. На рис. 9 показан в качестве примера график закона Ома для участка цепи с сопротивлением 100 Ом. По горизонтальной оси отложено напряжение в вольтах, а по вертикальной оси — ток в амперах. Масштаб тока и напряжения может быть выбран каким угодно. Прямая линия проведена так, что для любой ее точки от-

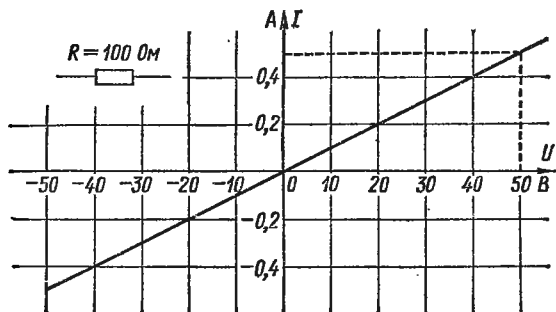


Рис. 9. Закон Ома (вольт-амперная характеристика)

ношение напряжения к току равно 100 Ом. Например, если $U = 50$ В, то $I = 0,5$ А и $R = 50 : 0,5 = 100$ Ом.

График закона Ома для отрицательных значений тока и напряжения имеет такой же вид. Это говорит о том, что ток в цепи проходит одинаково в обоих направлениях. Чем больше сопротивление, тем меньше получается ток при данном напряжении и тем более полого идет прямая.

Приборы, у которых вольт-амперная характеристика является прямой линией, проходящей через начало координат, т. е. сопротивление остается постоянным при изменении напряжения или тока, называются *линейными приборами*. Применяют также термины *линейные цепи*, *линейные сопротивления*.

Существуют также приборы, у которых сопротивление изменяется при изменении напряжения или тока. Тогда зависимость между током и напряжением выражается не по закону Ома, а более сложно. Для таких приборов вольт-

амперная характеристика не будет прямой линией, проходящей через начало координат, а является либо кривой, либо ломаной линией. Эти приборы называются *нелинейными* (см. рис. 21).

13. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

При изучении любой электрической цепи надо ясно понимать, какие величины ее характеризуют — это ток, сопротивление и напряжение. Последовательная цепь является основной цепью. Мы уже отмечали, что *ток в ней везде одинаков*. Рассмотрим теперь другие важные законы этой цепи.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad U = U_1 + U_2 + U_3$$

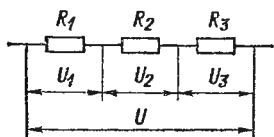


Рис. 10. Последовательное соединение резисторов

Пусть имеется электрическая цепь, в которой последовательно включены несколько приборов, обладающих различными сопротивлениями: R_1 , R_2 , R_3 (рис. 10). *Общее сопротивление R последовательной цепи равно сумме отдельных сопротивлений:*

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Иначе говоря, при последовательном соединении резисторов сопротивление цепи возрастает. Ток проходит все участки цепи один за другим, что равносильно увеличению длины провода.

Напряжение распределяется между участками последовательной цепи пропорционально их сопротивлениям. На участке с большим сопротивлением напряжение соответственно больше. Общее напряжение U , приложенное к последовательной цепи, равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Такое разделение общего напряжения между участками цепи вытекает из закона Ома. Напряжение на любом участке определяется произведением тока на сопротивление. Но ток везде одинаков. Поэтому напряжения на участках цепи зависят от сопротивлений этих участков.

Поясним свойства последовательной цепи на числовом примере. К источнику напряжением $U = 120$ В подключены соединенные последовательно два прибора сопротивлением $R_1 = 20$ Ом и $R_2 = 40$ Ом соответственно. Нужно найти общее сопротивление цепи R , ток I

и напряжения на отдельных участках U_1 и U_2 . Общее сопротивление $R = 20 + 40 = 60$ Ом. Ток найдем, разделив полное напряжение 120 В на общее сопротивление 60 Ом: $I = 120/60 = 2$ А. Умножая ток на сопротивления отдельных участков, определим напряжение на каждом из них: $U_1 = 2 \cdot 20 = 40$ В; $U_2 = 2 \cdot 40 = 80$ В.

Сумма этих напряжений равна полному напряжению $U = U_1 + U_2 = 40 + 80 = 120$ В.

Рассмотрим еще некоторые свойства последовательной цепи. Если изменить сопротивление одного участка последовательной цепи, то изменится ток не только в этом участке, но и во всех остальных частях цепи. Изменяются и напряжения на отдельных участках. Напряжение в цепи перераспределится. Если произошел разрыв цепи в одном из ее участков, то ток прекратится во всей цепи.

Таким образом, работа всей цепи зависит от каждого ее участка. Нельзя изменить работу какого-либо участка цепи, не оказав влияния на остальные участки. Это свойство последовательной цепи иногда является недостатком. Например, если осветительные лампы соединить последовательно, то при выключении одной из них погаснут и все остальные. Кроме того, в последовательной цепи для сохранения какого-либо постоянного значения тока при увеличении числа включенных приборов необходимо повышать напряжение, что не всегда возможно.

14. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ВСЕЙ ЦЕПИ

Каждый источник (генератор) ЭДС всегда обладает некоторым сопротивлением. Его называют *внутренним сопротивлением* и обозначают R_i или r_i . Ток внутри источника ЭДС встречает в нем сопротивление, как и в любом проводнике (рис. 11) и значение этого сопротивления для разных источников различно. В одних источниках оно равно долям ома или единицам ом, а в других достигает десятков, сотен, тысяч и даже миллионов ом. Более мощные источники ЭДС, способные давать большой ток, имеют обычно меньшее R_i , а у маломощных источников R_i бывает более высоким. Например, аккумуляторы имеют R_i около долей ома, сухие элементы — от долей ома до нескольких ом; у сухих батарей с большим числом последовательно соединенных элементов R_i достигает десятков и даже сотен ом. Внутреннее сопротивление элементов и аккумуляторов увеличивается по мере их разряда. Если внутреннее сопротивление генератора незначительно по сравнению с со-

противлением внешней части цепи, то R_i обычно не принимают во внимание, но это далеко не всегда допустимо.

Внешнее сопротивление часто называют *нагрузочным сопротивлением* или *нагрузкой*. Этот последний термин не совсем точный, так как, строго говоря, под нагрузкой надо понимать ток, который нагружает генератор. Однако принято слово «нагрузка» применять и для того прибора, который подключается к генератору и является потребителем энергии.

Общее сопротивление замкнутой цепи, которая всегда является последовательным соединением источника и

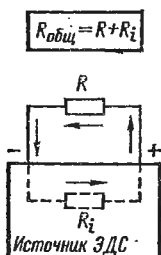


Рис. 11. Внутреннее сопротивление источника ЭДС

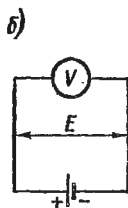
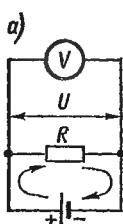


Рис. 12. Измерение напряжения на зажимах (а) и электродвижущей силы (б) источника

внешней части цепи, равно сумме внешнего и внутреннего сопротивлений:

$$R_{общ} = R + R_i.$$

Именно это полное сопротивление определяет ток в цепи. При прохождении тока через генератор внутри него получается падение напряжения U_i , которое можно подсчитать, умножив ток в цепи на внутреннее сопротивление: $U_i = IR_i$. Следовательно, часть ЭДС источника расходуется на преодоление внутреннего сопротивления самого источника,

Падение напряжения U_i внутри генератора является потерянным. Напряжение на внешней части цепи U всегда меньше, чем ЭДС источника E , на значение этого внутреннего падения напряжения:

$$U = E - U_i \text{ или } U = E - IR_i.$$

Иначе говоря, ЭДС генератора является суммой напряжений на R и на R_i , т. е.

$$E = U + U_i.$$

Напряжение внешней части цепи U есть не что иное, как напряжение на зажимах или полюсах генератора, так как концы внешней цепи подключены к полюсам этого генератора.

Следует всегда помнить, что напряжение на нагрузке и напряжение на зажимах генератора это одно и то же напряжение. Если к зажимам генератора присоединить вольтметр, то он покажет именно это напряжение (рис. 12, а), но не падение напряжения внутри генератора. Последнее вообще невозможно непосредственно измерить с помощью вольтметра.

Как видно, между понятиями электродвижущей силы и напряжения есть разница. Электродвижущая сила действует во всей замкнутой цепи, а напряжение является разностью потенциалов только на участке цепи, например на внешней ее части. Поэтому напряжение всегда меньше ЭДС; оно составляет лишь некоторую часть ЭДС.

Когда внутреннее сопротивление генератора невелико, то падение напряжения на нем незначительно и можно приближенно считать, что напряжение на зажимах генератора равно его ЭДС ($U \approx E$). Возможен случай, когда разность потенциалов на полюсах генератора точно равна ЭДС. Это будет в случае, когда внешняя цепь разомкнута. Тогда ток равен нулю, и поэтому нет падения напряжения внутри генератора ($U_i = 0$). Значит ЭДС можно определить как разность потенциалов на полюсах разомкнутого генератора.

Для измерения ЭДС источника тока нужно подключить к его полюсам вольтметр, а внешнюю цепь отсоединить (рис. 12, б). В действительности и в этом случае будет измерена не ЭДС, а несколько меньшая величина, так как вольтметр потребляет небольшой ток, создающий некоторую потерю напряжения внутри источника.

Чем больше сопротивление самого вольтметра, тем меньший ток он потребляет, тем меньше падение напряжения внутри источника и тем точнее будет измерена ЭДС.

Чтобы подсчитать ток в замкнутой цепи, надо разделить ЭДС на полное сопротивление цепи, т. е. на сумму внешнего и внутреннего сопротивлений:

$$I = E / (R + R_i) \text{ или } I = E / R_{\text{общ.}}$$

Это соотношение называется законом Ома для всей цепи. Его широко применяют для расчета электрических цепей и для объяснения многих явлений в них.

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется источник ЭДС, у которого $E = 60$ В и $R_i = 100$ Ом. К нему подключен прибор, сопротивление которого равно $R = 500$ Ом. Требуется найти ток в цепи, напряжение на зажимах источника и падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника ЭДС.

Решение этой задачи несложно. Найдем полное сопротивление цепи: $R_{\text{общ}} = 100 + 500 = 600$ Ом. Ток определим, разделив ЭДС на полное сопротивление цепи: $I = 60 : 600 = 0,1$ А. Применив закон Ома к внешней части цепи, т. е. умножив ток на внешнее сопротивление, найдем напряжение на зажимах источника $U = 0,1 \cdot 500 = 50$ В. Ясно, что напряжение внутри источника составляет 10 В. Это можно также найти, применяя закон Ома к внутреннему сопротивлению: $U_i = IR_i = 0,1 \cdot 100 = 10$ В.

Потери напряжения имеются не только на внутреннем сопротивлении, но и в соединительных проводах. Во многих случаях этими потерями пренебрегают, так как сопротивление соединительных проводов обычно невелико. Но если провода имеют значительную длину или если по ним проходит большой ток, то падение напряжения в проводах может быть весьма заметным, и полезное напряжение на нагрузке уменьшается. Примером этого является понижение напряжения в электрической сети в вечерние часы. Днем и ночью, когда потребление тока сравнительно невелико, падение напряжения в проводах сети незначительно, и поэтому напряжение, подводимое для питания осветительных ламп или сетевых приемников, имеет нормальное значение (например, 220 В). Вечером потребление тока возрастает, падение напряжения в проводах увеличивается и полезное напряжение сети снижается до 200 В и даже меньше.

15. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ЭДС

Выясним, как изменяется напряжение на зажимах источника при уменьшении внешнего нагрузочного сопротивления R . Предположим, что в примере, рассмотренном в предыдущем параграфе, R уменьшилось до 200 Ом. Тогда $R_{\text{общ}} = 100 + 200 = 300$ Ом. Получим ток, равный 0,2 А. Снова применяя закон Ома к внешней части цепи, получим $U = 40$ В и $U_i = 20$ В.

Как видим, уменьшение внешнего сопротивления невыгодно, так как оно сопровождается уменьшением напря-

жения на зажимах генератора и увеличением напряжения, теряемого внутри него. Чем меньше внешнее сопротивление, тем меньше полезное напряжение на зажимах источника и тем больше потери напряжения внутри генератора.

Пусть внешнее сопротивление цепи R уменьшено до нуля. Это может быть в том случае, когда полюса генератора замкнуты проводником, имеющим весьма малое сопротивление по сравнению с внутренним сопротивлением источника ЭДС. Это — режим *короткого замыкания* (рис. 13, а). В цепи практически останется одно внутреннее сопротивление и ток при коротком замыкании будет наибольшим. Его можно найти, поделив ЭДС на R_i . Полезное напряжение на зажимах источника становится равным нулю, а вся ЭДС теряется на внутреннем сопротивлении.

В большинстве случаев короткое замыкание является случаем бесполезной работы генератора. Полезная нагрузка отсутствует, и вся энергия генератора теряется в нем самом. Режим короткого замыкания, кроме того, весьма опасен для многих генераторов, потому что в этом режиме ток может иметь недопустимое значение для данного генератора. Это особенно относится к источникам с малым R_i , например к аккумуляторам, у которых при коротком замыкании возникает очень большой ток.

Однако в радиоэлектронной аппаратуре иногда генераторы ЭДС, обладающие большим внутренним сопротивлением, работают в режиме, весьма близком к короткому замыканию. Это делается в тех случаях, когда необходимо получить от генератора возможно больший ток. Высокое внутреннее сопротивление генератора ограничивает ток, и он не достигает значений, опасных для генератора.

Короткому замыканию противоположен случай разомкнутой внешней цепи, когда ток в цепи отсутствует, т. е. когда генератор работает *вхолостую* или в *режиме холостого хода* (рис. 13, б). В этом режиме напряжение на зажимах генератора имеет наибольшее значение и равно его ЭДС.

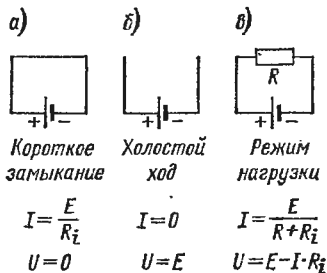


Рис. 13. Режимы работы источника ЭДС

Режим холостого хода или близкий к нему широко применяется в радиоэлектронных схемах, когда необходимо получить от генератора возможно большее напряжение.

Если внешнее сопротивление в несколько раз больше внутреннего сопротивления, то потерянное внутри генератора напряжение невелико, и напряжение на зажимах генератора близко к ЭДС. Такой режим нагрузки генератора во многих случаях является наиболее желательным, и его можно назвать *нормальным режимом* или *режимом нормальной нагрузки* (рис. 13, в).

Изменение напряжения источника при изменении тока наглядно показывает *внешняя характеристика генератора*, изображенная на рис. 14.

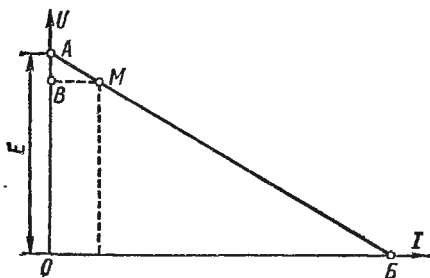


Рис. 14. Внешняя характеристика источника ЭДС

В ней по вертикальной оси отложено напряжение генератора U , а по горизонтальной оси — ток I . Увеличению тока соответствует уменьшение нагрузочного сопротивления R .

Внешняя характеристика представляет собой прямую линию и показывает, что при увеличении тока напряжение

уменьшается. На первый взгляд может показаться, что нарушается закон Ома. Ведь ток и напряжение пропорциональны друг другу, т. е. с увеличением тока напряжение должно расти, а не уменьшаться. Однако никакого противоречия с законом Ома нет. Прямая пропорциональность между током и напряжением существует только при условии, что сопротивление постоянно. Но в данном случае ток изменяется за счет изменения сопротивления и поэтому ЭДС источника перераспределяется по закону последовательной цепи, т. е. напряжения на участках цепи пропорциональны сопротивлениям этих участков. Чем меньше сопротивление нагрузки R , тем меньше на нем напряжение U , но зато соответственно увеличивается падение напряжения внутри источника.

На рис. 14 точка A является точкой холостого хода. В ней ток равен нулю, а напряжение достигает максимального значения, т. е. равно ЭДС (отрезок OA). Точка B яв-

ляется точкой короткого замыкания, так как для нее напряжение равно нулю, а ток достигает наибольшего значения (отрезок $ОБ$ равен току короткого замыкания). Нормальный режим соответствует различным точкам вблизи точки A , например точке M . Для этой точки отрезок $ОВ$ показывает напряжение на зажимах источника, а отрезок $ВА$ соответствует падению напряжения внутри источника.

16. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Помимо последовательной цепи, широко используется *параллельное соединение* (рис. 15). По своим свойствам оно противоположно последовательному соединению.

При параллельном соединении полный ток, идущий от генератора, разделяется на несколько токов по числу включенных приборов. Все эти токи I_1 , I_2 , I_3 одновременно проходят через отдельные приборы сопротивлением R_1 , R_2 , R_3 соответственно. Точки A и B , в которых происходит разделение тока на части, называют *точками разветвления*, а части цепи, включенные параллельно, называют ветвями или ответвлениями.

В отличие от последовательного соединения, при котором ток во всех частях цепи одинаков, при параллельном соединении напряжение на всех ветвях цепи всегда одинаково.

Каждый прибор подключен к полюсам генератора. Если пренебрегать сопротивлением соединительных проводов, то можно считать, что напряжение генератора приложено к каждой ветви параллельной цепи. Многие делают ошибку, считая, что при различном сопротивлении ветвей напряжение на них различно. Надо твердо помнить, что независимо от сопротивления включенных параллельно приборов, напряжения на них всегда равны.

Разделение тока при параллельном соединении происходит по следующему закону: сумма токов, вытекающих из точки разветвления, т. е. сумма токов в ветвях, равна полному току, втекающему в точку разветвления:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Этот закон называют *первым законом Кирхгофа* (в честь немецкого физика Г. Р. Кирхгофа).

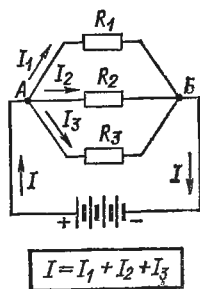


Рис. 15. Параллельное соединение резисторов

В точке разветвления не может происходить потери части электронов. Поэтому общее число электронов, проходящих в одну секунду через поперечное сечение всех ветвей, такое же, как и в проводе до точки разветвления. Конечно, и для второй точки разветвления, в которой все токи снова соединяются вместе, справедливо такое же правило: *сумма токов, втекающих в точку разветвления, равна току, вытекающему из этой точки.*

Такой же закон справедлив и для воды, например, в случае разветвления реки на два рукава. Общее количество воды, протекающей в обоих рукавах, всегда равно количеству воды в основном русле, так как в месте разветвления вода не исчезает и ниоткуда дополнительно не прибывает.

Первый закон Кирхгофа является следствием рассмотренного ранее закона постоянства тока в отдельных частях последовательной цепи. Действительно, хотя отдельные ветви соединены между собой параллельно, но все они, вместе взятые, включены в цепь последовательно. Суммарный ток в них должен быть такой же, как и в остальных частях цепи.

По существу, первый закон Кирхгофа вытекает из закона сохранения материи, так как электроны являются материальными частицами. Они не могут исчезать в точке разветвления или возникать в ней из ничего.

Применяя закон Ома к отдельным ветвям цепи, нетрудно решить вопрос о том, на какие части делится ток при параллельном соединении. Если сопротивления ветвей одинаковы, то ток разделится на равные части. Например, если параллельно включены четыре одинаковых прибора, то через каждый из них протекает ток, составляющий четвертую часть общего тока. Сложнее случай, когда сопротивления ветвей различны. Так как напряжение на ветвях одно и то же, токи в них неодинаковы. Там, где сопротивление больше, ток меньше, и, наоборот, через ветвь с меньшим сопротивлением пойдет больший ток.

Можно сказать, что *ток разделяется на части, прямо пропорциональные проводимостям или обратно пропорциональные сопротивлениям ветвей.* Например, если имеются три ветви с сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 (или проводимостями G_1 , G_2 , G_3), то токи I_1 , I_2 , I_3 в этих ветвях связаны друг с другом зависимостью:

$$I_1 : I_2 : I_3 = G_1 : G_2 : G_3 = 1/R_1 : 1/R_2 : 1/R_3.$$

Для двух ветвей получается более простая формула:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1.$$

Решим следующий пример. Две электрические лампы, имеющие сопротивление $R_1 = 300$ Ом и $R_2 = 600$ Ом, соединены параллельно и подключены к генератору напряжением $U_2 = 120$ В. Соответственно ток в каждой лампе равен: $I_1 = 120 : 300 = 0,4$ А и $I_2 = 120 : 600 = 0,2$ А. Общий ток равен сумме токов ветвей $I = I_1 + I_2 = 0,4 + 0,2 = 0,6$ А.

В отличие от последовательной цепи, в которой при включении новых приборов сопротивление увеличивается, при параллельном соединении в этом случае сопротивление уменьшается, а проводимость возрастает.

Включение параллельно одному прибору другого такого же равносильно увеличению вдвое площади поперечного сечения провода, следовательно, сопротивление цепи уменьшится в два раза, а проводимость станет в два раза больше. При включении параллельно третьего прибора с таким же сопротивлением площадь сечения увеличится втрое и общее сопротивление цепи уменьшится в три раза. При этом проводимость возрастает в три раза. Чем больше приборов включается параллельно, тем больше создается путей для тока, тем меньше общее сопротивление и тем выше проводимость цепи.

Таким образом, при параллельном соединении одинаковых приборов общее или эквивалентное сопротивление уменьшается во столько раз, сколько включено ветвей. Например, если соединены параллельно три прибора, имеющие сопротивление по 60 Ом, то общее сопротивление цепи равно 20 Ом.

Когда параллельно включены приборы с различным сопротивлением, то общее сопротивление также уменьшается и будет всегда *меньше самого меньшего*. Это правило нетрудно понять. Если в цепь сначала включен один прибор с наименьшим сопротивлением, то параллельное подключение к нему любого другого прибора создает дополнительный путь для тока, т. е. как бы увеличивает площадь сечения провода, проводимость увеличивается, а сопротивление цепи уменьшается.

Подсчет общего сопротивления цепи при параллельном соединении большого числа различных приборов довольно сложен. На практике чаще всего параллельно соединены только два прибора. Если их сопротивления различны, то для определения общего сопротивления R нужно произ-

ведение сопротивлений R_1 и R_2 разделить на их сумму:

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Например, если параллельно соединены приборы, имеющие сопротивления $R_1 = 20$ Ом и $R_2 = 30$ Ом, то их общее сопротивление $R = 20 \cdot 30 / (20 + 30) = 600/50 = 12$ Ом.

Общее сопротивление получилось меньше, чем наименьшее сопротивление, равное 20 Ом.

Если параллельно соединены три прибора, имеющие сопротивления $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 30$ Ом и $R_3 = 4$ Ом, то сначала подсчитывают общее сопротивление первых двух приборов. В предыдущем примере оно было равно 12 Ом. Таким образом, заменяют сопротивления R_1 и R_2 одним сопротивлением, равным 12 Ом. После этого находят общее сопротивление параллельно соединенных ветвей, сопротивления которых равны 12 и 4 Ом соответственно: $R = 12 \cdot 4 / (12 + 4) = 48/16 = 3$ Ом.

Это и будет общее сопротивление всех трех ветвей. Оно также получилось меньше наименьшего сопротивления, т. е. меньше 4 Ом. Подобным методом можно определить общее сопротивление и при большем числе параллельно включенных ветвей.

Общее сопротивление при параллельном соединении различных приборов, имеющих сопротивления $R_1, R_2, R_3, \dots$, можно также находить по следующей формуле:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$$

Эта формула говорит о том, что общая проводимость параллельной цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

Для приведенного выше примера получаем: $1/R = 1/20 + 1/30 + 1/4$. Чтобы вычислить R , сложим дроби, стоящие в правой части равенства: $1/R = (3 + 2 + 15)/60 = 20/60 = 1/3$. Отсюда следует, что $R = 3$ Ом.

Можно решить задачу в общем виде, т. е. вывести формулу в буквенном виде, а затем уже подставлять значения величин. Для трех ветвей получаем

$$1/R = (R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2) / (R_1 R_2 R_3),$$

отсюда

$$R = (R_1 R_2 R_3) / (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1).$$

Подставив числовые значения, находим: $R = (20 \cdot 30 \cdot 4) / (20 \cdot 30 + 30 \cdot 4 + 4 \cdot 20) = 3$ Ом.

В параллельном соединении главным всегда является меньшее из сопротивлений ветвей, так как через эту ветвь идет большая часть общего тока. Иногда могут быть параллельно соединены два прибора с весьма различными сопротивлениями. Тогда прибор с большим сопротивлением пропускает ничтожную часть тока, и он почти не влияет на значение общего сопротивления. В этом случае общее со-

противление незначительно меньше, чем наименьшее из этих двух сопротивлений.

Параллельное включение одного прибора к другому иногда называют *шунтированием*. Таким образом, при шунтировании какого-либо прибора другим, имеющим значительно большее сопротивление, общее сопротивление приближенно можно считать неизменившимся. Это наглядно показывает следующий числовой пример. Найдем общее сопротивление цепи, если параллельно соединены приборы, имеющие сопротивление 100 и 10 000 Ом соответственно, $R = (100 \cdot 10\,000) / (100 + 10\,000) = 99$ Ом.

Как видно, общее сопротивление равно почти 100 Ом.

Достоинством параллельного соединения является независимость работы каждой ветви от других ветвей. Если выключить одну из ветвей, то остальные ветви будут работать по-прежнему, а если изменить сопротивление какой-либо ветви, то в ней ток изменится, но в остальных ветвях изменений не произойдет. Поэтому в электрической сети различные потребители — лампы накаливания, электронагревательные приборы, электродвигатели и т. д. — как правило, включены параллельно.

Практически все же иногда наблюдается влияние одной ветви на другую из-за наличия внутреннего сопротивления генератора и сопротивления соединительных проводов. Например, если выключить одну из ветвей, то общее сопротивление цепи возрастет, а ток уменьшится. Но тогда уменьшатся потери напряжения внутри генератора и в соединительных проводах, идущих от генератора, и полезное напряжение между точками разветвления повысится. Поэтому ток в оставшихся ветвях несколько возрастет. Подобно этому включение дополнительной ветви вызовет увеличение общего тока, увеличение падения напряжения внутри генератора, некоторое уменьшение напряжения на его зажимах и, следовательно, некоторое уменьшение тока в ветвях. Такое же влияние будет наблюдаться при изменении сопротивления какой-либо ветви.

17. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ И СЛОЖНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

В электрических цепях довольно часто встречается *смешанное* соединение, представляющее собой комбинацию последовательного и параллельного соединений. Если взять, например, три прибора, то возможны два варианта смешан-

ного соединения. В одном случае соединяются два прибора параллельно, а к ним последовательно подключается третий (рис. 16, а). Такая цепь имеет два последовательно включенных участка, один из которых представляет собой параллельное соединение. По другой схеме соединены последовательно два прибора, а параллельно к ним подключен третий (рис. 16, б). Эту цепь следует рассматривать как параллельное соединение, в котором одна ветвь сама является последовательным соединением.

При большем количестве приборов могут быть различные, более сложные схемы смешанного соединения. Иногда встречаются более сложные цепи, содержащие несколько источников ЭДС.

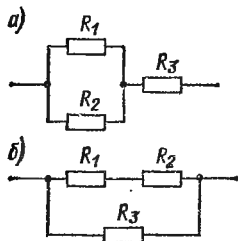


Рис. 16. Смешанное соединение резисторов

Для расчета сложных цепей существуют различные методы. Наиболее общим из них является применение второго закона Кирхгофа. В самом общем виде этот закон гласит, что *во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений*. Необходимо брать алгебраическую сумму потому, что ЭДС, действующие навстречу

друг другу, или падения напряжения, созданные противоположно направленными токами, имеют разные знаки.

При расчете сложной цепи в большинстве случаев бывают известны сопротивления отдельных участков цепи и ЭДС, включенных источников. Чтобы найти токи, следует в соответствии со вторым законом Кирхгофа составить для замкнутых контуров уравнения, в которых токи являются неизвестными величинами. К этим уравнениям надо добавить уравнения для точек разветвления, составленные по первому закону Кирхгофа. Решая эту систему уравнений, определим токи. Конечно, для более сложных цепей этот метод получается довольно громоздким, так как приходится решать систему уравнений с большим числом неизвестных.

Применение второго закона Кирхгофа можно показать на следующих простейших примерах.

Пример 1. Дана электрическая цепь (рис. 17). ЭДС источников равны $E_1 = 10$ В и $E_2 = 4$ В, а внутренние сопротивления $r_1 = 2$ Ом и $r_2 = 1$ Ом соответственно. ЭДС источников действуют навстречу. Нагрузочное сопротивление $R = 12$ Ом. Найти ток I в цепи.

Решение. Так как в данном случае имеется лишь один замкнутый контур, то составляем одно единственное уравнение:

$$E_1 - E_2 = IR + Ir_1 + Ir_2.$$

В левой его части имеем алгебраическую сумму ЭДС, а в правой части — сумму падений напряжений, создаваемых током I на всех последовательно включенных участках R , r_1 и r_2 .

Иначе уравнение можно написать в таком виде:

$$E_1 - E_2 = I(R + r_1 + r_2)$$

или

$$I = (E_1 - E_2) / (R + r_1 + r_2).$$

Подставив числовые значения, получим: $I = (10 - 4) / (12 + 2 + 1) = 6/15 = 0,4$ А.

Эту задачу, конечно, можно было решить на основании закона Ома для всей цепи, имея в виду, что при включении двух источников ЭДС навстречу друг другу, действующая ЭДС равна разности $E_1 - E_2$, а общее сопротивление цепи является суммой сопротивлений всех включенных приборов.

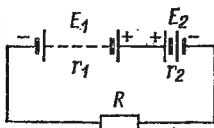


Рис. 17. Электрическая цепь с двумя источниками, включенными навстречу друг другу

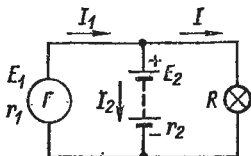


Рис. 18. Параллельная работа источников, имеющих разные ЭДС

Пример 2. Более сложная схема представлена на рис. 18. На первый взгляд она кажется довольно простой.

Два источника (для примера взят генератор постоянного тока и аккумуляторная батарея) соединены параллельно и к ним подключена лампочка. ЭДС и внутренние сопротивления источников соответственно равны: $E_1 = 12$ В, $E_2 = 9$ В, $r_1 = 0,3$ Ом, $r_2 = 1$ Ом. Сопротивление лампочки $R = 3$ Ом. Необходимо найти токи I_1 , I_2 , I и напряжение U на зажимах источников.

Поскольку ЭДС E_1 больше, чем E_2 , то в данном случае генератор E_1 , очевидно, заряжает аккумулятор и одновременно питает лампочку.

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа.

Для контура, состоящего из обоих источников,

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2.$$

Уравнение для контура, состоящего из генератора E_1 и лампочки, имеет вид

$$E_1 = I_1 r_1 + IR.$$

И, наконец, в контуре, в который входит аккумулятор и лампочка, токи направлены навстречу друг другу и поэтому для него

$$E_2 = IR - I_2 r_2.$$

Эти три уравнения недостаточны для определения токов, так как только два из них являются независимыми, а третье может быть получено из двух других. Поэтому надо взять любые два из этих уравнений и в качестве третьего написать уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 = I_2 + I.$$

Подставив в уравнения числовые значения величин и решив их совместно, получим: $I_1 = 5$ А; $I_2 = 1,5$ А; $I = 3,5$ А; $U = 10,5$ В.

Напряжение на зажимах генератора на 1,5 В меньше его ЭДС, так как ток, равный 5 А, создает потери напряжения, равные 1,5 В, на внутреннем сопротивлении $r_1 = 0,3$ Ом. Зато напряжение на зажимах аккумуляторной батареи больше ее ЭДС на 1,5 В, потому что батарея заряжается током, равным 1,5 А. Этот ток создает на внутреннем сопротивлении батареи ($r_2 = 1$ Ом) падение напряжения, равное 1,5 В, оно и прибавляется к ЭДС.

Не следует думать, что напряжение U всегда будет средним арифметическим E_1 и E_2 , как это оказалось в данном частном случае. Можно только утверждать, что в любом случае U должно находиться между E_1 и E_2 .

18. МОЩНОСТЬ И РАБОТА ТОКА

Работой электрического тока называют превращение его энергии в какую-либо другую энергию, например в тепловую, световую, механическую. В электротехнике принято оценивать работоспособность тока по его мощности, которая обозначается буквой P .

Мощность определяется работой, совершаемой в одну секунду. Иначе можно сказать, что *мощность есть расход электрической энергии в одну секунду.*

Единицей измерения мощности является ватт (Вт), названный в честь английского изобретателя Д. Уатта.

По международной системе ватт обозначают W. *Мощность, равная одному ватту, есть мощность тока в один ампер при напряжении в один вольт.*

Чем больше напряжение и ток, тем больше мощность. Чтобы подсчитать мощность тока, нужно умножить напряжение в вольтах на ток в амперах:

$$P = UI.$$

Например, если при напряжении 120 В через некоторый прибор проходит ток 3 А, то мощность тока в этом приборе составляет 360 Вт.

Часто бывает необходимо подсчитать мощность тока, когда неизвестны ток или напряжение, но известно сопротивление. Тогда нужно сначала с помощью закона Ома определить ток или напряжение, а затем уже найти мощность. Заменяя в основной формуле для определения мощ-

ности ток или напряжение, определенные по закону Ома, можно получить еще две формулы для расчета мощности:

$$P = I^2 R \text{ и } P = U^2 / R.$$

Эти две формулы часто применяются для практических расчетов. Смысл их понять нетрудно. Действительно, если ток в данном приборе увеличился в два раза, то это могло произойти только благодаря повышению напряжения в два раза. Но если и напряжение и ток увеличились в два раза, то мощность возрастет в четыре раза по сравнению с током. А чтобы при увеличении сопротивления сохранить неизменным ток, необходимо соответственно увеличить напряжение. Во столько же раз возрастет и мощность, так как в этом случае повышается лишь одно напряжение, а ток остается постоянным.

Если напряжение на данном приборе увеличить в несколько раз, то во столько же раз возрастет и ток. Значит, мощность возрастет в квадрате, так как напряжение и ток увеличились в одинаковое число раз. Но если при неизменном напряжении увеличить сопротивление, то соответственно уменьшится ток, а следовательно, и мощность также уменьшится. Поэтому во второй формуле сопротивление стоит в знаменателе.

Рассмотренные две формулы как будто противоречат друг другу: по одной формуле мощность при увеличении сопротивления увеличивается, а по другой — уменьшается. Но это противоречие кажущееся, потому что первая формула соответствует постоянному току, а вторая — постоянному напряжению.

Приведем следующие примеры. Пусть требуется найти мощность тока $I = 0,2$ А, протекающего через прибор, имеющий сопротивление $R = 1000$ Ом. Решить пример можно двумя способами. Определим напряжение по закону Ома: $U = 0,2 \cdot 1000 = 200$ В. Теперь подсчитаем мощность: $P = 200 \cdot 0,2 = 40$ Вт.

Тот же результат можно получить по формуле: $P = I^2 \cdot R = 0,2^2 \cdot 1000 = 40$ Вт.

Рассмотрим еще один пример. Определим мощность тока в лампе, которая имеет сопротивление 200 Ом и питается напряжением, равным 100 В.

Проще всего применить формулу: $P = U^2 / R = 100^2 / 200 = 50$ Вт. Но можно сначала найти ток: $I = 100 : 200 = 0,5$ А, а затем найти мощность по основной формуле: $P = 100 \cdot 0,5 = 50$ Вт.

Иногда бывает необходимо найти ток или напряжение, зная мощность. Например, нужно определить ток в лампе мощностью 300 Вт при напряжении 120 В. Так как мощность — это произведение напряжения на ток, то для нахождения тока надо мощность разделить на напряжение: $I = 300 : 120 = 2,5$ А.

Кроме основной единицы мощности — ватта, часто применяют следующие единицы: *киловатт* (кВт), *гектоватт* (гВт), *милливатт* (мВт) и *микроватт* (мкВт), соответственно равные 1000 Вт, 100 Вт, 0,001 Вт и 0,000 001 Вт. Международные обозначения этих единиц: kW, hW, mW, μ W.

Поскольку в радиоэлектронных устройствах ток часто измеряют в миллиамперах или даже в микроамперах, а напряжение — в милливольтах, то полезно помнить, что, умножая миллиамперы на вольты, получаем мощность в милливаттах, при умножении микроампер на вольты получим мощность в микроваттах, а умножение миллиампер на милливольты дает мощность в микроваттах.

Работа электрического тока или расход электрической энергии измеряется единицами, в которых за основу взяты единицы мощности, но при этом учитывается время прохождения тока. Мощность есть работа тока за одну секунду, а работа тока может осуществляться за любой промежуток времени, в течение которого проходит ток. Чем больше времени проходит ток, тем больше работа тока.

Основной единицей измерений работы тока является *джоуль*, названный в честь английского ученого Дж. Джоуля. Один джоуль — это работа тока мощностью один ватт в течение одной секунды. Эта единица слишком мала, так как обычно ток проходит в течение продолжительного времени. Более крупной единицей является *ватт-час* (Вт·ч), равный работе тока мощностью один ватт в течение одного часа. Широко применяются еще более крупные единицы: *гектоватт-час* (гВт·ч) и *киловатт-час* (кВт·ч), соответственно равные 100 и 1000 Вт·ч.

Подсчет количества энергии, расходуемой на освещение или питание сетевого приемника, ведется в гектоватт-часах или киловатт-часах. Электросчетчики учитывают расход энергии именно в этих единицах. Не следует выражать электроэнергию в киловаттах и гектоваттах, т. е. в единицах мощности, так как работа и мощность не одно и то же.

Расчет работы тока, т. е. расчет расхода электроэнергии очень прост. Нужно умножить мощность на время.

Найдем для примера стоимость энергии, которую потребляет из сети в течение месяца приемник, работающий ежедневно по 4 ч, если мощность тока, питающего приемник, равна 50 Вт. Общее число часов работы приемника составляет $4 \cdot 30 = 120$ ч.

Электрическая работа будет равна $50 \cdot 120 = 6000$ Вт·ч. При стоимости одного киловатт-часа электроэнергии, равной 4 коп., стоимость потребляемой приемником энергии равна $6 \cdot 4 = 24$ коп.

В замкнутой электрической цепи обычно различают *полезную* мощность, *мощность рассеяния* и *полную*. Полезная мощность потребляется нагрузкой (например, лампой накаливания), которая питается от источника ЭДС. Будем обозначать мощность в нагрузке P_n . Мощность рассеяния выделяется внутри источника и бесполезно расходуется на его нагрев. Обозначим ее P_i . Из закона сохранения энергии следует, что сумма этих двух мощностей составляет полную мощность электрической цепи P , т. е.

$$P = P_n + P_i.$$

Это равенство можно написать в виде $EI = UI + U_i I$. Сократив на I , получим $E = U + U_i$, т. е. второй закон Кирхгофа для замкнутой цепи, который отражает закон сохранения энергии.

Источник ЭДС (генератор) должен создавать полную мощность, но только часть ее является полезной, а другая часть неизбежно теряется внутри генератора, поскольку он имеет внутреннее сопротивление. Показателем, характеризующим, насколько эффективно в данной цепи используется полная мощность генератора, служит *коэффициент полезного действия (КПД)*. Он равен отношению полезной мощности к полной. Иначе говоря, *КПД показывает, какую долю полной мощности составляет полезная мощность*. КПД обозначается η и обычно выражается в процентах. Таким образом,

$$\eta = P_n / P = P_n / (P_n + P_i)$$

или в процентах

$$\eta = \frac{P_n}{P} 100 \, \%.$$

Если мощность выразить через ток и сопротивление, то можно написать

$$\eta = I^2 R_n / (I^2 R_n + I^2 R_i).$$

Сократив на I^2 , получим

$$\eta = R_n / (R_n + R_i),$$

отсюда видно, что КПД зависит от соотношения между внешним и внутренним сопротивлением цепи.

Если внешнее сопротивление меньше внутреннего, то большая часть полной мощности теряется внутри генерато-

ра и КПД будет низким. Это наиболее невыгодный случай работы электрической цепи. В частности, если внешнее сопротивление равно нулю, т. е. если генератор работает в режиме короткого замыкания, то вся мощность расходуется на нагрев самого генератора. КПД равен нулю. Но все же в маломощных радиоэлектронных устройствах такой режим иногда применяют, если надо получить возможно больший ток, а значение КПД несущественно.

Иногда в радиоэлектронных устройствах внешнее сопротивление цепи бывает равно внутреннему сопротивлению генератора: $R_n = R_i$. Тогда полная мощность делится пополам и КПД составляет 50 %. Такое значение КПД еще нельзя считать высоким, однако этот режим работы представляет большой интерес потому, что при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений полезная мощность будет наибольшей по сравнению с ее значениями во всех других случаях. Подобный режим часто применяют в радиотехнических цепях, если основной задачей является получение возможно большей полезной мощности.

Режим работы при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений называют *режимом отдачи максимальной мощности*. Часто также говорят, что в этом случае *генератор согласован с нагрузкой*, что осуществлено согласование генератора с нагрузкой или согласование внутреннего сопротивления с внешним. В этом режиме КПД будет равен 50 %, но при малых мощностях высокий КПД не является обязательным. В мощных электрических цепях подобный режим, конечно, применять нельзя. Так, например, если бы мощная электростанция имела КПД всего лишь 50 %, то это означало бы недопустимую растрату половины мощности.

Убедимся в том, что отдача максимальной мощности происходит при условии $R_n = R_i$. Для этого рассмотрим, например, работу генератора, имеющего $E = 100$ В и $R_i = 10$ Ом, при различных сопротивлениях нагрузки.

В режиме холостого хода, т. е. при $R_n = \infty$, ток $I = E/(R_n + R_i) = 100/\infty = 0$ и $U = E = 100$ В. Никакой мощности в этом режиме генератор не создает и $P = P_n = P_i = 0$. О КПД в этом случае говорить не имеет смысла, так как нет никаких мощностей, но теоретически $\eta = 100$ %. Это легко получить из формулы $\eta = R_n/(R_n + R_i)$. Если разделить числитель и знаменатель на R_n , то получим $\eta = 1/(1 + R_i/R_n)$. При $R_n = \infty$ можно написать $\eta = 1/(1 + 0)$, т. е. $\eta = 1$ или 100 %.

Если $R_n = 1000$ Ом, т. е. $R_n \gg R_i$, то $I = E/(R_i + R_n) = 100/(10 + 1000) \approx 0,099$ А; $U = IR_n \approx 0,099 \cdot 1000 = 99$ В; $U_i = E - U = 100 - 99 = 1$ В; $P_n = UI \approx 99 \cdot 0,099 \approx 9,9$ Вт; $P =$

$= EI = 100 \cdot 0,099 = 10$ Вт; $P_i = P - P_n \approx 10 - 9,9 \approx 0,1$ Вт; $\eta = P_n/P \approx 9,9/10 \approx 0,99 = 99\%$. Как видно, КПД близок к 100 %.
Предлагаем самому читателю вычислить значения I , U , U_i , P_n , P , P_i и η при $E = 100$ В, $R_i = 10$ Ом и R_n равном 10; 2,5 Ом и нулю.

Таблица 2

R_n , Ом	I , А	U , В	U_i , В	P_n , Вт	P , Вт	P_i , Вт	η , %
∞	0	100	0	0	0	0	100
1000	0,099	99	1	9,9	10	0,1	99
10	5	50	50	250	500	250	50
2,5	8	20	80	160	800	640	20
0	10	0	100	0	1000	1000	0

Результаты этих вычислений даны в табл. 2, из которой видно, что максимальная мощность в нагрузке P_n действительно будет при $R_n = R_i = 10$ Ом, но при этом $U = 0,5 E = 50$ В и $\eta = 50\%$. Видно так же, что при коротком замыкании генератор создает наибольшую мощность $P = P_i = 1000$ Вт, но вся она теряется внутри самого генератора на его нагрев.

Итак, для получения более высокого КПД, что особенно важно при значительных мощностях, внешнее сопротивление должно быть больше внутреннего. Чем больше внешнее сопротивление, тем выше КПД, тем ближе он к 100 %.

19. ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ТОКА

Любой генератор всегда характеризуется электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением R_i . Он создает определенную ЭДС, которая не зависит от сопротивления нагрузки. Поэтому такой генератор и называют генератором ЭДС. Иногда его представляют в виде некоторого идеального генератора ЭДС, не имеющего внутреннего сопротивления, и включают в цепь последовательно с резистором, сопротивление которого равно R_i .

В некоторых случаях для упрощения расчетов заменяют генератор ЭДС на так называемый эквивалентный генератор тока, создающий ток, не зависящий от нагрузки. Такую замену можно обосновать следующими математическими преобразованиями.

Ток, даваемый генератором ЭДС,

$$I = E/(R_n + R_i).$$

Умножив обе части равенства на R_n , получим выражение для напряжения на зажимах генератора, т. е. напряже-

ния на нагрузке

$$U = IR_n = ER_n / (R_n + R_i).$$

А теперь умножим и разделим правую часть на R_i :

$$U = \frac{E}{R_i} \cdot \frac{R_n R_i}{R_n + R_i}.$$

В полученной формуле E/R_i есть ток короткого замыкания, а выражение $R_n R_i / (R_n + R_i)$ есть общее сопротивление параллельно включенных ветвей с сопротивлениями R_n и R_i . Отсюда и следует, что генератор ЭДС можно заменить генератором тока, дающим ток E/R_i , но при этом R_i следует

считать сопротивлением ветви, подключенной параллельно к нагрузке R_n (рис. 19).

Пользоваться заменой генератора ЭДС на эквивалентный генератор тока иногда бывает удобно для расчетов, в частности, если нагрузка имеет несколько ветвей, соединенных параллельно, так как тогда все сводится к расчету параллельной цепи. Если же при расчете пользоваться генератором ЭДС, то получится смешанное соединение, так как R_i будет включено

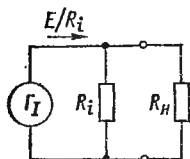


Рис. 19. Эквивалентный генератор тока

последовательно с нагрузкой, которая сама является параллельной цепью. Смешанное же соединение рассчитывать сложнее, особенно для цепей переменного тока.

Однако следует помнить, что с помощью генератора тока можно правильно рассчитывать ток, напряжение и мощность только в нагрузке. Нельзя с помощью генератора тока производить расчет тока, напряжения и мощности внутри генератора, так как будут получены совершенно неправильные результаты. Таким образом, использование схемы электрической цепи с генератором тока не соответствует действительности и служит лишь для расчета электрического режима нагрузки. А с генератором ЭДС всегда получается правильное отражение действительных процессов в электрической цепи и результаты расчета для любой части цепи будут верны.

20. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Каждый проводник при прохождении тока нагревается. Движущиеся в проводнике электроны испытывают столкновения с молекулами проводника и заставляют их двигаться

быстрее. Конечно, эти столкновения следует понимать в том смысле, что на самом деле электроны только очень близко подходят к частицам проводника и передают им свою энергию. Более быстрое движение молекул приводит к повышению температуры. Чем больше мощность тока и чем дольше ток проходит по проводнику, тем сильнее проводник будет нагреваться. Законы теплового действия тока установил в 1844 г. русский академик Э. Х. Ленц. Независимо от него их также открыл английский ученый Дж. Джоуль.

Поскольку мощность зависит от тока, напряжения и сопротивления, то от этих же величин зависит и количество тепла, создаваемого током. Очень важно, что при увеличении тока количество выделяющегося тепла возрастает в квадрате. Если ток увеличится, например, в три раза, то нагрев проводника усилится в девять раз. Такое увеличение нагрева проводника часто вызывает неприятные последствия — может сгореть изоляция и даже расплавиться сам проводник.

Широко применяется тепловое действие тока. В осветительных лампах накаливания нить служит источником света, а в радиолампах она используется для получения потока электронов. Тепловое действие тока используется в электронагревательных приборах (плитка, утюг, паяльник и т. д.). В плавких предохранителях имеется проволока, которая расплавляется при значительном возрастании тока. Предохранитель выбирается так, чтобы проволоку в нем расплавлял ток, несколько меньший, чем опасный для изоляции проводов.

Недопустимое увеличение тока происходит в случае, если к источнику подключается нагрузка, имеющая слишком малое сопротивление, т. е. если в цепи короткое замыкание. Большой ток при коротком замыкании опасен не только для проводов, но и для самого источника. Плавкие предохранители защищают источник ЭДС и провода от опасных последствий короткого замыкания (рис. 20). Самодельным плавким предохранителем на небольшой ток может быть

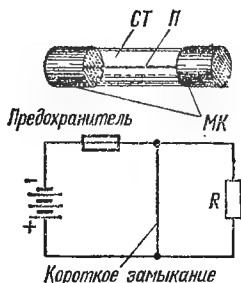


Рис. 20. Плавкий предохранитель и его включение для защиты источника ЭДС от последствий короткого замыкания

СТ — стеклянная трубка; П — проволока; МК — металлические контакты

полоска свинцовой или оловянной бумаги (станиоль) большей или меньшей ширины.

Для выбора проводника в плавком предохранителе необходимо знать значение тока, при котором проводник плавится. В табл. 3 приводятся значения этих токов для проводников различного диаметра.

Нагрев провода током зависит от *плотности тока*, которая представляет собой ток, приходящийся на единицу площади поперечного сечения провода, и выражается в амперах на квадратный миллиметр (А/мм²). Обозначив плотность тока греческой буквой δ , можно написать:

Таблица 3

Ток плавления, А	Диаметр провода, мм		
	медь	сталь	свинец
1	0,05	0,12	0,2
2	0,09	0,19	0,3
3	0,11	0,25	0,4
5	0,16	0,35	0,6
7	0,2	0,45	0,8
10	0,25	0,55	1,0

$$\delta = I/S,$$

где S — площадь поперечного сечения провода.

Чтобы провода не перегревались, их подбирают исходя из определенных норм плотности тока. Для обмоток, состоящих из нескольких слоев изолированной проволоки и

имеющих поэтому плохое охлаждение, плотность тока не должна превышать 2,5—3,5 А/мм². У реостатов, обмотка которых состоит из одного слоя неизолированной проволоки, намотанной на какой-либо теплостойкий материал, например на керамику, плотность тока может достигать 6 А/мм², так как в этом случае провод охлаждается гораздо лучше.

При расчете проводов на допустимую плотность тока площадь поперечного сечения провода можно определить по приближенной формуле: $S \approx 0,8 d^2$. Например, для провода диаметром $d = 0,5$ мм получим площадь поперечного сечения $S = 0,8 \cdot 0,5^2 = 0,8 \cdot 0,25 = 0,2$ мм². Если допустимая плотность тока равна 3 А/мм², то через этот провод можно пропускать ток $I = 0,2 \cdot 3 = 0,6$ А. Полезно помнить, что при изменении диаметра провода площадь его поперечного сечения, а следовательно, и допустимый ток изменяются в квадрате. Если вместо провода диаметром 0,5 мм взять провод диаметром 1 мм, то площадь поперечного сечения увеличится в четыре раза. Допустимый ток при плотности тока 3 А/мм² будет составлять уже не 0,6 А, а 2,4 А.

В табл. 1 приведены допустимые токи для проводов разного диаметра при плотности тока 3 А/мм². С помощью этой

таблицы можно подобрать провод нужного диаметра. Например, если в обмотке из изолированного провода должен протекать ток 100 мА, то следует взять провод диаметром около 0,2 мм. При допустимой плотности тока, превышающей 3 А/мм², ток соответственно увеличивается. Если для намотки реостата, рассчитанного на ток 3 А, используется неизолированный провод, то диаметр провода должен быть 0,8 мм. Этот провод при допустимой плотности 6 А/мм² можно нагрузить током 3 А (в табл. 1 указан ток 1,5 А при плотности 3 А/мм²).

Для комнатной электропроводки, осуществляемой шнуром или каким-либо другим изолированным медным проводом, приняты допустимые нагрузки током:

Площадь сечения провода, мм ²	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6
Допустимый ток, А	7	9	11	14	20	25	31

При нагреве металлических проводников их сопротивление, как правило, увеличивается.

Очень мало изменяется при нагреве сопротивление реостатных сплавов (никелин, манганин, нихром и др.). Сопротивление медного провода при нагреве до 250 °С увеличивается вдвое. Вольфрамовая нить лампы накаливания при нормальном накале имеет сопротивление примерно в десять раз больше, чем в холодном состоянии, что нужно учитывать при использовании ламп накаливания в качестве реостатов. В отличие от металлов сопротивление угля при нагреве уменьшается. Это объясняется тем, что в угле при нагреве значительно ослабевает связь многих электронов с ядрами атомов. Такие электроны называют *электронами проводимости*. Они получают возможность двигаться вдоль проводника, т. е. участвовать в создании электрического тока. Следовательно, проводимость угля возрастает с увеличением температуры. Подобное явление наблюдается также у полупроводников, к которым относятся окислы различных металлов, например закись меди, двуокись урана, а также кремний, германий, селен и многие другие вещества.

Как мы знаем, приборы, изменяющие свое сопротивление при изменении тока, называются *нелинейными*. На рис. 21, а изображена вольт-амперная характеристика нелинейного прибора, который значительно повышает свое сопротивление при возрастании тока (например, лампочка накаливания с вольфрамовой нитью). А на рис. 21, б дана

вольт-амперная характеристика нелинейного прибора, сопротивление которого уменьшается при возрастании тока. Подобная зависимость характерна для полупроводниковых

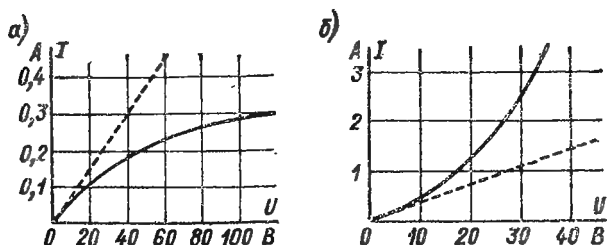


Рис. 21. Вольтамперные характеристики нелинейных приборов

приборов. Если бы сопротивление оставалось постоянным, т. е. было бы линейным, то характеристика представляла бы собой прямую, показанную на рис. 21 штриховой линией.

21. РЕЗИСТОРЫ, РЕОСТАТЫ И ДЕЛИТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ

Проволочные резисторы применяются в том случае, когда нужно иметь постоянное сопротивление или когда в цепи проходит большой ток. Резисторы с небольшим сопротивлением изготовляют, наматывая неплотно виток к витку неизолированную проволоку. Если же сопротивление должно составлять сотни, тысячи или десятки тысяч ом, то резистор делают из изолированной проволоки.

Промышленность выпускает так называемые проволочные эмалированные (остеклованные) резисторы. Они изготовляются из неизолированной проволоки, намотанной на керамическую трубку, и покрываются защитным слоем стекловидной эмали. Эти резисторы имеют номинальное значение сопротивления от единиц ом до десятков килоом и рассчитаны на мощность от единиц до десятков ватт.

Поскольку невозможно изготовить резисторы абсолютно точно, то всегда у любого резистора существует некоторое отклонение его истинного сопротивления от номинального значения. Оно оценивается так называемым *допуском*, т. е. допустимым отклонением, выраженным в процентах. Чаще всего резисторы имеют допуск ± 5 , ± 10 и ± 20 %. Для измерительной и специальной аппаратуры выпускаются бо-

лее точные резисторы с допуском даже в доли процента, но они являются более дорогими и, конечно, не применяются там, где высокая точность не нужна.

Проволочные резисторы нестандартного типа часто выполняются путем намотки реостатного провода на пластинку или стержень из изоляционного материала, который должен быть теплостойким в том случае, если провод резистора значительно нагревается.

Для малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры изготавливаются резисторы из микропровода, диаметр которого равен тысячным долям миллиметра. Один метр такого провода имеет сопротивление в десятки килоом. Производство этих микропроводов разработано в СССР.

Как уже отмечалось, проволочные резисторы являются более стабильными и могут быть изготовлены на значительные токи. Их можно изготовить более точно. Они выдерживают нагрев до сравнительно высокой температуры. Однако их не делают на очень большие сопротивления, так как наматывать огромное количество реостатной проволоки слишком громоздко и дорого.

В непроволочных резисторах проводником служит слой углерода или металлического сплава или окиси металла. Этот слой наносят на стержень или трубку из керамики и покрывают защитным слоем эмалевой краски. Эти резисторы могут иметь сопротивление от единиц ом до десятков мегаом и даже более. Очень большие сопротивления до нескольких гигаом (один гигаом это миллиард ом) делаются из так называемых композиций, т. е. смесей проводящих и диэлектрических порошков с каким-либо связующим веществом.

Достоинством непроволочных резисторов является очень высокое сопротивление, сравнительно малые размеры и малая стоимость. Недостатки этих резисторов по сравнению с проволочными — это меньшая стабильность, меньшая точность и более низкая теплостойкость.

Непроволочные резисторы рассчитаны на мощность от 0,05 Вт до десятков ватт. Для увеличения сопротивления у них иногда в проводящем слое бывает прорезана по винтовой линии канавка, что увеличивает длину проводящего слоя.

Значения номинального сопротивления, допуска и предельной мощности обычно бывают указаны на самом резисторе. В последние годы номинал сопротивления и допуск обозначаются по сокращенной кодированной системе.

По этой системе обозначают: единицы — буквой Е, килоомы — К, мегаомы — М, гигаомы — Г, причем буква одновременно играет роль запятой. Обозначение сопротивления строится так, чтобы было только две цифры. Допуск указывается буквой в конце обозначения. Для наиболее распространенных допусков приняты буквы: В для $\pm 20\%$, С для $\pm 10\%$, И для $\pm 5\%$. Так, например, запись К47В означает $0,47 \text{ кОм} \pm 20\%$, 2 К7И означает $2,7 \text{ кОм} \pm 5\%$, 10 МС означает $10 \text{ МОм} \pm 10\%$. Подобные сокращенные обозначения особенно удобны для малогабаритных резисторов, на которые неудобно наносить много знаков (см. рис. 7, б).

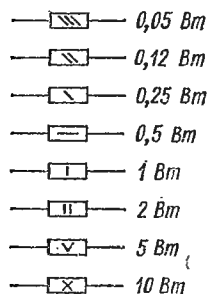


Рис. 22. Изображение на схемах резисторов, рассчитанных на различную мощность

На схемах резисторы, рассчитанные на различную мощность, изображают часто так, как представлено на рис. 22, а; их сопротивление указывают по следующей системе. Сопротивления от 1 до 999 Ом обозначаются целыми числами, а от 1 до 999 кОм цифрами, указывающими число килоом, с буквой «к». Большие сопротивления выражаются в мегаомах. При целом числе мегаом для отличия от сопротивлений в омах после цифры ставится запятая и ноль. Когда сопротивление составляет доли ома или выражается не целым числом омов, после численного значения сопротивления ставится наименование Ом.

Примеры обозначения сопротивлений на схемах: $R_1 800$ соответствует $R_1 = 800 \text{ Ом}$; $R_2 40 \text{ к}$ — $R_2 = 40 \text{ кОм}$; $R_3 1,7 \text{ к}$ — $R_3 = 1700 \text{ Ом}$; $R_4 2,0 \text{ М}$ — $R_4 = 2 \text{ МОм}$.

Если нет резисторов, рассчитанных на нужную мощность, то соединяют последовательно, параллельно или смешанно несколько таких резисторов, чтобы их общее сопротивление было равно заданному. Пусть, например, требуется резистор, на котором должно падать напряжение 200 В при токе 10 мА или 0,01 А. Сопротивление равно $R = 200 : 0,01 = 20\,000 \text{ Ом} = 20 \text{ кОм}$. Мощность составляет $200 \cdot 0,01 = 2 \text{ Вт}$. Если имеются резисторы на 0,5 Вт, то нужно взять четыре таких резистора. Можно соединить четыре резистора по 5 кОм последовательно или четыре резистора по 80 кОм параллельно, или, наконец, четыре резистора по 20 кОм смешанно, т. е. параллельно две группы по два последовательно включенных резистора в каждой группе. Во всех этих случаях общее сопротивление равно 20 кОм, а предельная мощность составит 2 Вт.

Широкое применение в радиосхемах имеют переменные резисторы. Проволочные переменные резисторы изготов-

ляются из неизолированной проволоки. Обычно она предварительно накаливается и поэтому имеет на поверхности слой окиси, который является изоляцией для небольших напряжений и позволяет наматывать провод виток к витку. По обмотке может двигаться подвижный контакт, включающий в цепь большую или меньшую часть провода. Иногда подвижный контакт движется по пружинящей пластинке и прижимает ее к проволоке в том или ином месте. В такой конструкции устраняется перетирание проволоки, а если резистор непроволочный, то поверхность проводящего слоя не будет металлизироваться от движения подвижного контакта.

На рис. 23 представлено изображение переменных резисторов на схемах. В большинстве случаев переменный резистор имеет три вывода: крайние от концов резистора и средний от подвижного контакта. Когда переменный резистор включается в схему последовательно, т. е. двумя точками — подвижным контактом и одним из концов, то он работает как реостат. Такое включение часто применяют, если нужно регулировать ток и напряжение в каком-нибудь приборе, например в лампе (рис. 24). Тогда на долю лампы останется лишь часть напряжения. Перемещая подвижный контакт, изменяют сопротивление реостата, а значит, и сопротивление всей цепи. Ток изменяется и вместе с ним изменяется падение напряжения как на реостате, так и на лампе. Иначе говоря, происходит перераспределение напряжения в цепи. Чем больше сопротивление реостата, тем больше падение напряжения на нем и тем меньше напряжение на лампе.

Если сопротивление реостата уменьшается до нуля, то все напряжение источника будет приложено к потребителю. Чтобы уменьшить напряжение на потребителе до нуля, нужно реостатом разорвать цепь. Для этого подвижный контакт, находящийся в крайнем положении, переводят с проволоки или проводящего слоя на изоляцию. При этом напряжение на потребителе снижается от некоторого наименьшего значения до нуля не плавно, а скачком. В некоторых конструкциях переменных резисторов возможность разрыва цепи не предусмотрена.

В тех случаях, когда сопротивление потребителя очень велико, например составляет несколько мегаом, для регулировки напряжения в широких пределах, реостат должен

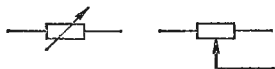


Рис. 23. Изображение на схемах переменных резисторов

иметь сопротивление десятки или сотни мегаом, что практически трудно выполнить.

Перемещая подвижный контакт, в цепь вводят ту или иную часть реостата (рис. 24). Такое включение является простейшим и применяется наиболее часто, но оно имеет крупный недостаток. Если контактирование подвижного контакта с проводом в некоторых местах нарушается и происходит разрыв цепи, то к этому разрыву будет приложено напряжение, равное ЭДС источника. В результате возникает искрение, а за счет него происходит обгорание подвижного контакта и провода. Реостат разрушается. Кроме того, искрение создает помехи радиоприемникам.

На рис. 25 показана более совершенная схема включения реостата, в которой при перемещении подвижного кон-

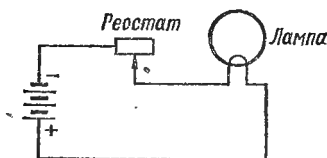


Рис. 24. Включение реостата для регулировки накала лампы

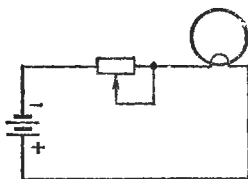


Рис. 25. Усовершенствованная схема включения реостата

такта замыкается накоротко большая или меньшая часть провода. В этом случае разрыв цепи не может произойти. Если нарушится контакт между проводом и подвижным контактом, то в цепи останется включенным весь реостат. К месту разрыва контакта будет приложено лишь напряжение, падающее на том участке реостата, который до этого был замкнут накоротко. Но оно является только частью ЭДС источника (остальная часть ЭДС падает на другом участке реостата и на нагрузке). Это напряжение меньше, чем в схеме рис. 24. Искрение получается гораздо слабее, а следовательно, меньше будут износ реостата и радиопомехи.

Для понижения напряжения на нагрузке нередко последовательно в цепь включают вместо реостата постоянный резистор, который называют *понижающим*. Иногда включают такой резистор и дополнительно к нему реостат.

Если необходимо плавно регулировать напряжение от наибольшего значения до нуля (как мы говорили уже, рео-

стат такой возможности не дает), то применяют плавный делитель напряжения, называемый *потенциометром*. Это название нельзя признать удачным, так как потенциометр ничего не измеряет. Потенциометр представляет собой переменный резистор, все три вывода которого включены в цепь (рис. 26). Напряжение подводится к концам потенциометра. Подвижный контакт и один из концов подключают к потребителю. Перемещая подвижный контакт, присоединяют потребитель к любой части потенциометра и таким путем плавно регулируют напряжение на нагрузке от нуля до наибольшего значения (рис. 26, б и в).

Следует правильно понимать схему включения потенциометра. Иногда ошибочно считают, что он включен параллельно. На самом деле такое соединение получается

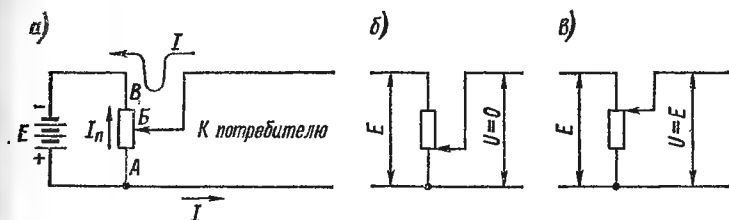


Рис. 26. Включение потенциометра для регулировки напряжения

лишь тогда, когда подвижный контакт стоит в крайнем положении, соответствующем наибольшему напряжению (рис. 26, в). Если же подвижный контакт стоит в каком-то среднем положении (рис. 26, а), то соединение потребителя с потенциометром надо рассматривать как смешанное. Действительно, потребитель подключен параллельно к участку AB потенциометра, а участок BB присоединен последовательно к разветвлению, образованному участком AB и потребителем. Напряжение на потребитель подается от участка AB или, как говорят, «снимается» с этого участка. Однако нельзя считать, что участок AB является источником ЭДС или источником энергии для потребителя.

Ток потребителя (ток нагрузки) I протекает через участок BB , а не через участок AB . Кроме того, через весь потенциометр протекает ток I_n самого потенциометра. Таким образом, токи в участках AB и BB неодинаковы. В участке BB ток больше и является суммой токов $I + I_n$, отсюда следует, что напряжение, подводимое к потенциометру, распределяется не пропорционально сопротивлениям

его участков. Например, пусть подвижный контакт стоит точно посередине, т. е. сопротивления участков AB и BB равны. Но на участке BB напряжение больше, так как в этом участке протекает больший ток. По этой же причине при движении ползунка напряжение, снимаемое с потенциометра, изменяется не пропорционально сопротивлению участка AB . При увеличении напряжения от нуля оно сначала изменяется медленно, а затем быстрее. Наиболее резко напряжение меняется вблизи максимального значения.

Изменение сопротивления нагрузки при питании его от потенциометра сопровождается изменением напряжения. Пусть, например, сопротивление потребителя возросло. Тогда уменьшится потребляемый им ток и, следовательно, уменьшится падение напряжения на участке BB потенциометра. Но тогда соответственно возрастет падение напряжения на участке AB , так как сумма напряжений на этих участках всегда равна подводимому напряжению, т. е. является величиной постоянной. Когда сопротивление потребителя бесконечно велико, т. е. когда ток нагрузки равен нулю, напряжения на потенциометре распределяются пропорционально сопротивлениям участков AB и BB . Такой ненагруженный потенциометр иногда применяется в радиосхемах.

Кроме потенциометров, применяются также *делители напряжения*, состоящие из двух или большего числа постоянных резисторов, соединенных последовательно и включенных на полное напряжение. Нагрузка подключается параллельно к одному из резисторов (рис. 27), и на нем получается напряжение, составляющее некоторую часть полного напряжения. К делителю, состоящему из нескольких резисторов, можно подключить несколько потребителей, для нормальной работы которых требуются различные напряжения. Делитель уменьшает или делит напряжение так же, как и потенциометр, но не дает возможности регулировать напряжение. Все, что было сказано о распределении токов и напряжений применительно к потенциометру, относится также и к делителю.

Через потенциометр или делитель всегда проходит некоторый ток независимо от того, включен потребитель или нет. Этот ток нагревает потенциометр или делитель и является бесполезным. Для его уменьшения желательно, чтобы сопротивление делителя или потенциометра не было слишком малым. Однако, если сопротивление потенциометра такого же

порядка, как и сопротивление потребителя или превышает последнее, то при перемещении ползунка потенциометра напряжение будет изменяться очень неравномерно, что неудобно. Для более равномерной регулировки напря-

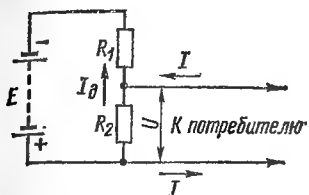


Рис. 27. Включение делителя напряжения

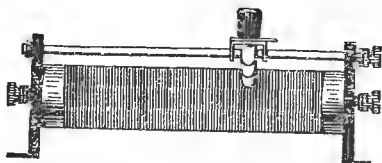


Рис. 28. Реостат с ползунком

жения необходимо, чтобы сопротивление потенциометра было меньше сопротивления потребителя.

Переменные резисторы, используемые в качестве реостатов или потенциометров, имеют различные конструкции. Для электротехнических установок, а также для лабораторных работ выпускаются реостаты, внешний вид которых показан на рис. 28. У них провод намотан на керамическую трубу, вдоль которой может передвигаться подвижный контакт. В радиотехнической аппаратуре

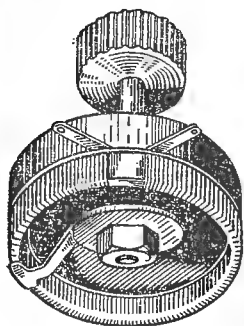


Рис. 29. Реостат с кольцевой намоткой

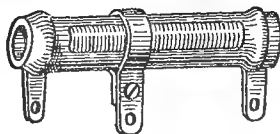


Рис. 30. Эмалированный резистор с подвижным контактом

применяются реостаты или потенциометры с проволоочной обмоткой, выполненной на кольцевом каркасе (рис. 29). Подвижный контакт в таких конструкциях укреплен на оси и при вращении скользит по проволоке. Эмалированные резисторы могут иметь подвижный контакт (рис. 30). Он прижимается к обмотке, часть которой не покрыта эмалью.

Весьма распространенными являются переменные непроволочные резисторы. Они выпускаются различных типов. Внешний вид одного из таких резисторов показан на рис. 31, *а*. В этих резисторах внутри защитного металлического кожуха находится токопроводящий угольный слой, нанесенный на подковообразную пластинку из изолирующего материала (рис. 31, *б*). Для обеспечения надежного контакта с выводными лепестками концы пластинки покрываются слоем металла. Подвижный контакт, укрепленный

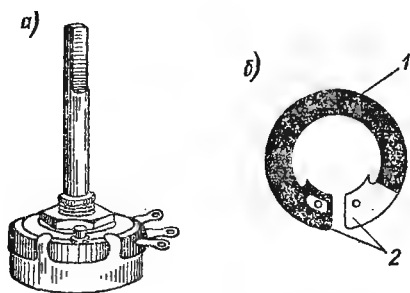


Рис. 31. Переменный непроволочный резистор: *а* — внешний вид; *б* — пластинка с токопроводящим слоем (1) и контактами (2)

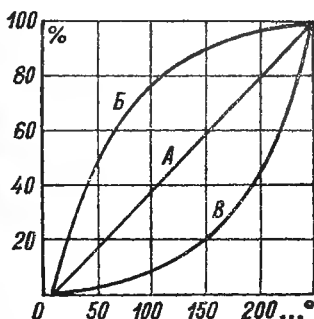


Рис. 32. Зависимость сопротивления от угла поворота ползунка для различных типов переменных резисторов

на оси, иногда не скользит непосредственно по токопроводящему слою, а прижимает к нему упругую тонкую металлическую пластинку.

Все непроволочные переменные резисторы по характеру изменения сопротивления в зависимости от угла поворота подвижного контакта делятся на линейные (тип А), логарифмические (тип Б) и показательные (тип В). На рис. 32 показаны графики изменения сопротивления для этих трех типов резисторов.

Иногда переменные резисторы имеют дополнительный выключатель. Его контакты выведены отдельно и надежно изолированы от самого сопротивления.

22. РАСЧЕТ РЕОСТАТОВ, ПОТЕНЦИОМЕТРОВ И ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПЯЖЕНИЯ

Для расчета реостата понижающего резистора необходимо знать напряжение, которое будет падать на нем, и ток. Сопротивление определяется по закону Ома. Если резистор проволочный, то по допустимой

плотности тока находят диаметр провода и площадь его поперечного сечения. Для многослойных обмоток из изолированного провода следует принимать $\delta = 3 \text{ А/мм}^2$, а для однослойной намотки неизолированным проводом на теплостойком основании можно допустить $\delta = 6/\text{А мм}^2$ и даже больше. Расчет проводов по допустимой плотности тока был приведен в § 20. Для расчета сопротивления можно воспользоваться формулой, приведенной в § 11, или табл. 1. Если резистор непроволочный, то он выбирается по мощности, рассеивающейся в нем.

Пример 1. Рассчитать понижающий резистор из никелиновой проволоки для цепи накала лампы, потребляющих при напряжении 1,2 В ток 0,45 А от источника напряжением 1,5 В.

Решение. Падение напряжения на резисторе $U = 1,5 - 1,2 = 0,3 \text{ В}$. Сопротивление должно быть равным $R = 0,3 : 0,45 = 0,67 \text{ Ом}$. Если взять неизолированный провод и допустить плотность тока $\delta = 6 \text{ А/мм}^2$, то по табл. 1 найдем, что диаметр провода должен быть равен 0,3 мм (площадь поперечного сечения $0,07 \text{ мм}^2$). Этот провод выдерживает ток $I = 0,21 \text{ А}$ при плотности $\delta = 3 \text{ А/мм}^2$, а при плотности $\delta = 6 \text{ А/мм}^2$ можно допустить ток 0,45 А. Из той же таблицы находим, что один метр этого провода имеет сопротивление 5,36 Ом. Длина провода будет равна $l = 0,67 : 5,36 = 0,125 \text{ м} = 12,5 \text{ см}$. Тот же результат можно получить по формулам.

Пример 2. Определить, какой нужно взять непроволочный резистор, если он должен работать при $U = 80 \text{ В}$ и $I = 5 \text{ мА}$.

Решение. Сопротивление равно: $80 : 5 = 16 \text{ кОм}$. Мощность тока $80 \cdot 5 = 400 \text{ мВт} = 0,4 \text{ Вт}$. Следовательно, можно взять резистор, рассчитанный на мощность 0,5 Вт.

Для расчета делителя напряжения (см. рис. 27) необходимо знать напряжение источника $U_{\text{и}}$, подводимое к делителю, напряжение U , снимаемое с делителя (с резистора R_2), ток потребителя (ток нагрузки) I и ток самого делителя $I_{\text{д}}$. Сопротивления резисторов делителя R_1 и R_2 определяют по закону Ома. Через R_2 проходит только ток $I_{\text{д}}$. Поэтому

$$R_2 = U/I_{\text{д}}.$$

А через R_1 проходит ток делителя и ток нагрузки. Напряжение на нем равно разности $U_{\text{и}} - U$. Следовательно, можно написать:

$$R_1 = (U_{\text{и}} - U)/(I_{\text{д}} + I).$$

Для проволочных резисторов надо диаметр и длину провода рассчитывать так, как это было указано для поглотительных резисторов и реостатов. Непроволочные резисторы выбирают, рассчитав сначала мощность тока в каждом из них:

$$P_1 = (I_{\text{д}} + I)(U_{\text{и}} - U); \quad P_2 = I_{\text{д}}U.$$

При расчете делителя $U_{\text{и}}$ и I обычно бывают заданы, а ток делителя необходимо выбрать. Чтобы бесполезный расход энергии источника на нагрев самого делителя был возможно меньше, следует выбирать ток $I_{\text{д}}$ малым. Однако иногда желательно обеспечить с помощью делителя возможно большее постоянство напряжения U при изменении тока нагрузки I . В таком случае распределение напряжения на резисторах делителя должно мало зависеть от тока I . Это возможно при условии, что ток делителя $I_{\text{д}}$ значительно больше тока нагрузки. Тогда влиянием тока I можно пренебречь. Таким образом, ток $I_{\text{д}}$ выбирают меньшим

или большим в зависимости от того, что нужно получить: малый расход энергии в самом делителе или более стабильное напряжение на нагрузке. Если делитель имеет больше двух резисторов, то расчет делается подобным же образом.

Пример. Рассчитать неперывочные резисторы делителя напряжения для получения напряжения 80 В от источника напряжением 200 В. При этом ток нагрузки равен 20 мА, а ток делителя выбран 10 мА.

Решение. Находим сопротивления резисторов делителя: $R_1 = (200 - 80)/(10 + 20) = 120/30 = 4 \text{ кОм}$; $R_2 = 80/10 = 8 \text{ кОм}$. Мощности, рассеиваемые в этих резисторах, равны: $P_1 = 120 \cdot 30 = 3600 \text{ мВт} = 3,6 \text{ Вт}$; $P_2 = 80 \cdot 10 = 800 \text{ мВт} = 0,8 \text{ Вт}$.

Таким образом, резистор R_1 придется взять на мощность не менее 4 Вт, а R_2 — 1 Вт.

Расчет потенциометров (см. рис. 26) имеет особенности. Это объясняется тем, что в разных положениях подвижного контакта потенциометра деление напряжения получается весьма различным. Сопротивление потенциометра R рассчитывают по значениям подводимого напряжения E и выбранного тока I_{Π} , потребляемого самим потенциометром:

$$R = E/I_{\Pi}.$$

При перемещении подвижного контакта ток I_{Π} несколько изменяется. Он имеет наибольшее значение при крайних положениях подвижного контакта, когда через потенциометр протекает только один ток I_{Π} .

Наиболее опасным в отношении нагрева является случай, когда подвижный контакт находится в положении, близком к точке В (см. рис. 26). Тогда через небольшой участок потенциометра $БВ$ протекает ток потенциометра I_{Π} и ток нагрузки I , которые имеют почти максимальные значения. Для расчета следует брать именно максимальные токи.

Участок $БВ$ не должен перегреваться при прохождении суммарного тока $I_{\Pi} + I$. Если потенциометр проволочный, то диаметр провода рассчитывают по значению этого тока. А если применен неперывочный переменный резистор, то он должен быть выбран на такую мощность, которая соответствует суммарному току $I_{\Pi} + I$. Эта мощность равна:

$$P = (I_{\Pi} + I)^2 R.$$

Пример. Рассчитать неперывочный потенциометр, к которому подводится напряжение 80 В, если максимальный ток нагрузки 3 мА, а ток потенциометра выбран 2 мА.

Решение. Сопротивление потенциометра равно $R = 80/2 = 40 \text{ кОм}$. Суммарный ток равен $I_{\Pi} + I = 2 + 3 = 5 \text{ мА} = 0,005 \text{ А}$. Потенциометр должен быть выбран на мощность $P = 0,005^2 \cdot 40 \text{ 000} = 1 \text{ Вт}$.

В заключение отметим, что расчет диаметра провода d (в миллиметрах) по заданному току I (в амперах) и допустимой плотности тока δ можно делать не только с помощью табл. 1, но и по формуле

$$d = 1,13 \sqrt{I/\delta}.$$

Пример. Какого диаметра нужно выбрать провод для тока 250 мА при допустимой плотности 2 А/мм²?

Решение. Ток равен 0,25 А. По указанной выше формуле найдем диаметр провода: $d = 1,13 \sqrt{0,25/2} \approx 0,4 \text{ мм}$.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

23. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Еще в прошлом веке было установлено, что в пространстве вокруг провода с электрическим током возникают магнитные силы, действующие на другие проводники с током и на различные вещества. Особенно большое влияние магнитные силы оказывают на тела, состоящие из железа, стали и некоторых сплавов. Эти силы передаются с помощью материальной среды, которая находится в особом напряженном состоянии и называется магнитным полем.

Магнитное поле всегда создается движущимися электрическими зарядами. Неподвижные заряды не могут создать магнитного поля. Вокруг них, как мы знаем, образуется электростатическое поле. Кроме того, магнитное поле возникает при изменении электрического поля. Само магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды. На неподвижные заряды магнитное поле не влияет.

Магнитное поле обладает способностью проникать через многие вещества — воздух, стекло, бумагу, картон, медь, воду, а также через разреженное (безвоздушное) пространство. Таким образом, вокруг провода с током магнитное поле образуется в любых веществах. По современным физическим воззрениям магнитное поле представляет собой вид материи. Так как магнитное поле действует на различные предметы и может приводить их в движение, то ясно, что оно обладает энергией.

Магнитные силы действуют в магнитном поле по определенным направлениям, которые называют *магнитными силовыми линиями*. С их помощью можно удобно и наглядно показывать магнитное поле в том или ином случае. Изображение магнитного поля в виде совокупности некоторого числа силовых линий является довольно грубым и неточным. В действительности магнитное поле заполняет все пространство и через любую его точку проходит какая-то силовая линия. Однако для простоты изображают лишь небольшое число силовых линий, показывающих наиболее характерные особенности структуры поля.

Чтобы более точно изобразить магнитное поле, условились в тех местах, где поле сильнее, показывать силовые линии расположенными гуще, т. е. ближе друг к другу. И наоборот, в местах, где поле слабее, показывают силовые линии в меньшем количестве, т. е. расположенными реже. Взглянув на изображенное с помощью силовых линий магнитное поле, по густоте их расположения сразу можно сказать, где поле сильнее и где слабее. Таким образом, силовые линии отображают реально существующее материальное магнитное поле.

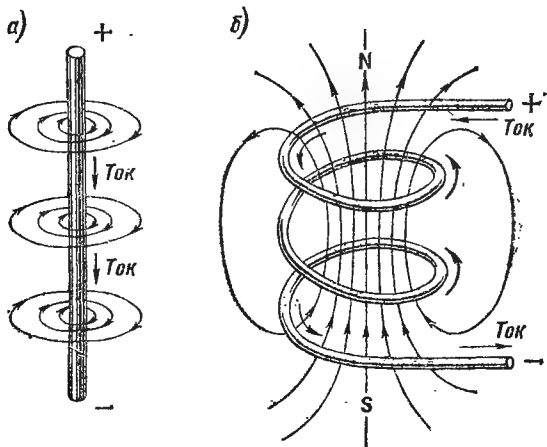


Рис. 33. Магнитное поле прямого провода и катушки

Иногда условно рассматривают магнитные силовые линии как некоторые упругие растянутые нити, которые стремятся сократиться, а также взаимно отталкиваются друг от друга (имеют взаимный боковой распор). Подобная аналогия помогает наглядно представить ряд явлений, происходящих в магнитном поле, но, конечно, не соответствует истине.

У прямого проводника силовые линии магнитного поля представляют собою концентрические окружности, охватывающие провод, как это показано на рис. 33, а. Эти линии имеются везде вокруг провода, но на рис. 33, а они изображены лишь в нескольких местах. Чем сильнее ток, тем сильнее магнитное поле вокруг провода. По мере удаления от провода с током магнитное поле постепенно ослабевает.

Направление магнитных силовых линий выбрано условно в соответствии с так называемым правилом винта: *если закручивать винт по направлению тока, то магнитные силовые линии будут направлены по вращению винта*. Иначе говоря, *если смотреть вдоль провода так, чтобы ток шел от нас, то магнитные силовые линии будут направлены по часовой стрелке*. В соответствии с этим правилом показаны силовые линии на рис. 33, а. Следует заметить, что в электромагнетизме направление тока принимается условное, т. е. от плюса к минусу.

Магнитные силовые линии всегда являются замкнутыми в отличие от электрических силовых линий, которые, как правило, начинаются на одном электрическом заряде и кончаются на другом (см. рис. 1).

Чтобы получить более сильное магнитное поле, применяют катушки с обмоткой из проволоки. В этом случае магнитные поля отдельных витков катушки складываются, и их силовые линии сливаются в общий магнитный поток. Картина магнитного поля катушки показана на рис. 33, б (многие силовые линии на этом рисунке изображены не полностью, но, конечно, все они являются замкнутыми). На том конце катушки, где ток идет против часовой стрелки, магнитные силовые линии выходят из катушки. Этот конец катушки называют *северным магнитным полюсом* и обозначают буквой *N* (от слова *North* или *Nord* — север) или *C*. Другой конец катушки называют *южным магнитным полюсом* и обозначают буквой *S* (от слова *South* или *Süd* — юг) или *Ю*. На этом конце катушки ток идет по часовой стрелке и магнитные силовые линии входят в катушку. Если изменить направление тока в катушке, то направление магнитного поля и магнитные полюса на концах катушки переменятся.

Взаимодействие катушек с током происходит по следующему правилу: *одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются*.

Чем больше число витков катушки и ток в ней, тем сильнее ее магнитное поле. Иначе говоря, магнитное поле катушки тем сильнее, чем больше произведение тока (в амперах) на число витков. Например, одинаковое магнитное поле можно получить, если через один виток протекает ток 1 А или если взять катушку с 50 витками и током 20 мА, или если ток 2 мА пропустить через катушку с 500 витками.

Во всех этих случаях через суммарное поперечное сечение проводников всех витков катушки проходит ток, равный 1000 мА.

Названия северный и южный полюс даны потому, что катушка с током, имеющая возможность легко вращаться в горизонтальной плоскости, стремится занять такое положение, чтобы ее северный полюс смотрел на север, а южный — на юг. Это объясняется взаимодействием магнитного поля катушки с магнитным полем Земли.

Причины существования магнитного поля, пронизывающего и окружающего земной шар, пока еще точно не выяснены. Установлено, что магнитное поле Земли связано с электрическими явлениями в атмосфере. На высоте в десятки и сотни километров над поверхностью Земли имеются ионизированные слои воздуха (ионосфера), в которых часть атомов распалась на положительные ионы и электроны. Ионизация воздуха вызвана действием солнечного излучения и космических лучей, приходящих на Землю из удаленных частей Вселенной.

Одна из теорий земного магнетизма считает, что вследствие вращения земного шара вокруг своей оси находящиеся в атмосфере электрически заряженные частицы создают ток. Получается, что земной шар как бы окружен одним витком провода с током. Магнитное поле Земли создается этим атмосферным током, причем у северного географического полюса находится южный магнитный полюс, а у южного географического — северный магнитный. По другой теории основную роль играют токи, возникающие внутри Земли из-за ее вращения.

Следует отметить, что изменение солнечного излучения, вызванное различными процессами, происходящими на Солнце, оказывает значительное влияние на ионосферу. При этом изменяется и магнитное поле Земли. Иногда наблюдаются очень сильные его изменения, называемые магнитными бурями. Они вызываются резкими изменениями солнечной активности, например, появлением солнечных пятен, представляющих собою гигантские взрывы.

24. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ,

НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитное поле характеризуется *магнитной индукцией* B . Она связана с густотой расположения магнитных силовых линий. Чем сильнее поле в данном месте про-

странства, тем гуще в нем расположены магнитные силовые линии и тем больше магнитная индукция. Поэтому магнитные силовые линии также называют *линиями магнитной индукции*.

Если в некоторой области магнитные силовые линии расположены равномерно, то поле в этой области называют *однородным*. Магнитная индукция B в нем везде одна и та же. Такое поле возникает внутри катушки, имеющей длину много больше диаметра. У концов катушки и вокруг нее поле неоднородно, а также слабее, нежели внутри катушки. В большинстве случаев только часть магнитного поля может быть однородной. Все поле приблизительно однородно у тороидальной катушки (рис. 34). Подобные катушки имеют практическое применение. Их достоинством является то, что поле расположено только внутри катушки и не рассеивается в окружающем пространстве.

Для характеристики силы магнитного поля вместо магнитной индукции B часто применяют *напряженность магнитного поля* H , которая пропорциональна магнитной индукции и связана с нею следующим соотношением:

$$H = B/\mu_a.$$

Здесь μ_a есть так называемая *абсолютная магнитная проницаемость*. Она характеризует магнитные свойства среды, в которой создано магнитное поле. Подробнее о магнитной проницаемости рассказано в следующем параграфе.

В тороидальной катушке напряженность поля тем больше, чем больше произведение тока I на число витков w и чем меньше длина l окружности, вдоль которой выполнена намотка. Иначе говоря, l есть средняя длина силовой линии. Формула для расчета напряженности поля тороидальной катушки имеет следующий вид:

$$H = Iw/l.$$

По этой формуле можно установить единицу напряженности поля.

Произведение Iw принято выражать в амперах, так как число витков не имеет размерности. Если произведение

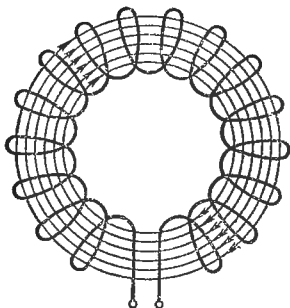


Рис. 34. Тороидальная катушка

I равно одному амперу и l равно одному метру, то H также равно единице, следовательно, напряженность измеряется в *амперах на метр* (A/m).

Таким образом, напряженность поля $1 A/m$ получается внутри тороидальной катушки со средней длиной силовой линии, равной одному метру, если вдоль нее расположено, например, 100 витков, а ток равен $0,01 A$, или если число витков составляет 1000, а ток равен $0,001 A$ и т. д.

Приведенная формула с некоторым приближением дает значение H и внутри цилиндрической катушки (см. рис. 33, б), причем l есть длина намотки. Чем она больше по сравнению с диаметром витка, тем меньше погрешность в определении H .

Если поле создано не катушкой, а прямым проводом, то H в какой-либо точке поля зависит от тока в проводе и расстояния между данной точкой и проводом.

Иногда встречается применявшаяся ранее единица измерений напряженности магнитного поля в системе СГС. Она названа *эрстедом* ($\mathcal{E}$) в честь датского физика Х. К. Эрстеда, который в 1820 г. открыл влияние тока на магнитную стрелку компаса. Можно считать, что $1 \mathcal{E} \approx 80 A/m$.

Магнитное поле, пронизывающее какую-либо площадь, называют *магнитным потоком*. Если такую площадь пронизывают все силовые линии данного поля, то говорят о *полном магнитном потоке*. Очевидно, что можно рассматривать частичный магнитный поток, составляющий лишь часть полного потока. Магнитный поток обозначается буквой Φ и измеряется в *веберах* (Wb). Эта единица измерений названа в честь немецкого ученого В. Вебера. Определение вебера будет дано в § 28. Ранее в системе СГС магнитный поток выражали в *максвеллах* (Mx), названных в честь английского физика Д. Максвелла, сделавшего выдающиеся исследования в теории электромагнетизма. Один максвелл составляет 10^{-8} вебера.

Поскольку магнитная индукция связана с плотностью магнитных силовых линий, то число силовых линий, проходящих через 1 см^2 площади поперечного сечения магнитного потока, пропорционально магнитной индукции B . Тогда общее число силовых линий, проходящих через площадь S перпендикулярно к ней, для однородного поля пропорционально произведению BS и определяет магнитный поток Φ , пронизывающий площадь S , т. е.

$$\Phi = BS,$$

отсюда $B = \Phi/S$, т. е. магнитная индукция представляет собой плотность магнитного потока. Если $\Phi = 1$ Вб и $S = 1$ м², то и B будет равна единице. Эта единица измерений магнитной индукции в честь югославского ученого Н. Тесла названа *тесла* (Тл). Таким образом, $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$. Ранее в системе СГС применялась единица магнитной индукции *гаусс* (Гс), названная в честь немецкого математика К. Гаусса, причем $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$.

25. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Если в магнитное поле, созданное в воздухе или в безвоздушном пространстве, поместить какое-либо тело, то поле будет изменяться. В одних телах магнитный поток получается сильнее, чем в окружающем пространстве. Это так называемые *парамагнитные* вещества. Другие вещества, наоборот, ослабляют магнитный поток. Они называются *диамагнитными*.

Величина, показывающая, во сколько раз изменяется магнитный поток в данном веществе по сравнению с магнитным потоком в воздухе, называется *относительной магнитной проницаемостью* или просто *магнитной проницаемостью* вещества и обозначается μ . Конечно, сравнивать следует магнитные потоки, проходящие через одинаковые площади.

Магнитная проницаемость является важной величиной, характеризующей магнитные свойства различных веществ. Для парамагнитных веществ $\mu > 1$, а для диамагнитных — $\mu < 1$. У большинства диамагнитных и парамагнитных веществ μ незначительно отличается от единицы. Строго говоря, $\mu = 1$ только для безвоздушного пространства (вакуум). Однако для воздуха практически можно считать, что $\mu = 1$.

Как было указано ранее, магнитные свойства веществ характеризует также *абсолютная магнитная проницаемость* μ_a , связанная с относительной магнитной проницаемостью соотношением:

$$\mu_a = \mu_0 \mu.$$

Здесь μ_0 представляет собой абсолютную магнитную проницаемость вакуума (воздуха). Ее называют *магнитной постоянной* и она равна $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{с/м}$. Если ввести μ_0 в ранее приведенные формулы для основных магнитных величин, то получим:

$$B = \mu_0 \mu H \text{ и } \Phi = \mu_0 \mu HS.$$

Среди парамагнитных веществ особое место занимают *ферромагнитные вещества*, у которых магнитная проницаемость доходит до сотен, тысяч и выше. К ферромагнитным веществам, имеющим широкое применение в электротехнике и радиотехнике, относятся, в частности, сталь, никель, кобальт, а также некоторые сплавы.

Значительное увеличение магнитного потока в ферромагнитных телах объясняется тем, что такие тела под действием внешнего магнитного поля намагничиваются и создают собственное магнитное поле. Оно складывается с намагничивающим полем и результирующее поле становится более сильным.

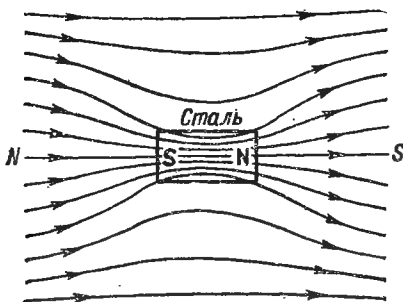


Рис. 35. Ферромагнитное вещество в магнитном поле

Магнитная индукция результирующего поля B является суммой индукции B_0 внешнего намагничивающего поля и индукции $B_{\text{внут}}$ внутреннего поля, возникшего под действием внешнего поля:

$$B = B_0 + B_{\text{внут}}.$$

На рис. 35 показано изменение магнитного поля, когда в него помещен ферромагнетик. Силовые линии поля втягиваются в этот предмет и в нем получается значительно более сильный магнитный поток, нежели в окружающем пространстве.

Современная физика объясняет магнитные свойства различных веществ следующим образом. Электроны, движущиеся вокруг ядра атома, представляют собой элементарные электрические токи, которые и создают магнитные поля. Если вещество не является ферромагнитным, то в нем элементарные магнитные поля расположены беспорядочно,

т. е. имеют различные направления. В таком веществе не создается заметного результирующего поля, а сами внутриатомные магнитные поля во внешнем пространстве практически не обнаруживаются.

Под действием внешнего магнитного поля происходит изменение расположения элементарных магнитных полей. Но у веществ, имеющих значение μ , близкое к единице, такое изменение незначительно. При этом у парамагнитных веществ результирующее магнитное поле элементарных токов складывается с внешним полем. Получается незначительное усиление поля. В диамагнитных веществах, наоборот, результирующее поле элементарных внутриатомных токов направлено навстречу внешнему полю и происходит незначительное ослабление поля. После прекращения влияния внешнего поля элементарные токи снова располагаются в беспорядке и результирующее внутреннее поле исчезает.

Иные явления наблюдаются в ферромагнитных веществах. При нормальных температурах они имеют кристаллическое строение. Маленькие кристаллы ферромагнитных веществ состоят из отдельных намагниченных областей, называемых доменами и имеющих размеры около 10^{-2} — 10^{-3} см. В каждом домене магнитные поля атомов расположены в определенном порядке, т. е. имеют одинаковые направления. В ненамагниченном теле магнитные поля доменов имеют различные направления (рис. 36, а). Под действием внешнего магнитного поля у части атомов, находящихся внутри доменов, магнитные поля поворачиваются и получают направления вдоль внешнего поля. Иначе говоря, домены, имеющие свое поле, почти совпадающее по направлению с внешним полем, увеличиваются в размерах за счет соседних доменов (рис. 36, б). Возникает сильное результирующее поле.

Чем сильнее внешнее намагничивающее поле, тем более строгий порядок наблюдается в расположении элементарных магнитных полей доменов и тем сильнее общий магнитный поток. При достаточно сильном намагничивающем поле магнитные поля всех доменов принимают одинаковое направление (рис. 36, в). Дальнейшее увеличение намагничивания становится невозможным. Такое состояние ферромагнитного тела называют *магнитным насыщением*.

Процесс намагничивания ферромагнитного вещества наглядно отражает *кривая намагничивания*. Она показывает зависимость магнитного потока Φ или магнитной индук-

ции B от напряженности намагничивающего поля H (рис. 37). Как видно, сначала на рис. 37 при увеличении H наблюдается быстрый рост магнитного потока (при малых

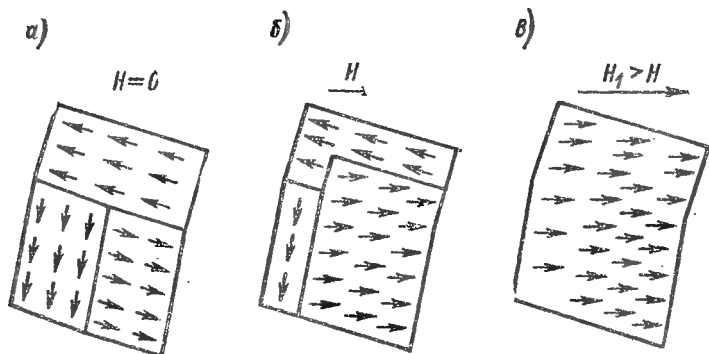


Рис. 36. Направление магнитных полей доменов в ферромагнитном веществе: а — при отсутствии внешнего поля; б — при наличии внешнего поля; в — при магнитном насыщении

значениях H это возрастание происходит несколько медленнее). Но при некотором значении H увеличение магнитного потока замедляется и далее почти прекращается, т. е. наступает магнитное насыщение. Небольшое увеличение

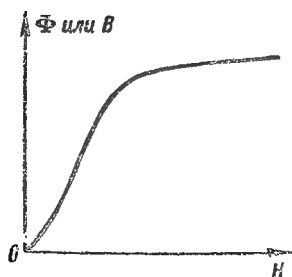


Рис. 37. Кривая намагничивания ферромагнитного вещества

магнитного потока при насыщении происходит за счет того, что растет внешнее намагничивающее поле.

Из рассмотрения кривой намагничивания можно сделать вывод, что магнитная проницаемость у ферромагнитных веществ не является постоянной, а зависит от H . Действительно, магнитная проницаемость $\mu = B/\mu_0 H$ могла бы оставаться постоянной только тогда, когда величина B изменялась бы пропорционально H , т. е. если бы кривая намагничивания представ-

ляла собою прямую линию, проходящую через начало координат. Кривая намагничивания показывает, что B изменяется не пропорционально H , поэтому μ при возрастании H сначала растет, а при переходе к магнитному насыщению она уменьшается (рис. 38).

Если ферромагнитное тело намагнитить с помощью внешнего магнитного поля, а затем уменьшать напряженность этого поля до нуля, то тело размагничивается не полностью. В нем обнаруживается *остаточный магнетизм*. Это объясняется тем, что не все домены под влиянием имеющегося в каждом теле теплового движения возвращаются к беспорядочному состоянию.

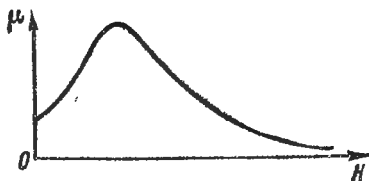


Рис. 38. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности намагничивающего поля

Остаточный магнетизм может быть показан с помощью *кривой намагничивания* (рис. 39). Если тело вначале не было намагничено, то при возрастании H магнитный поток изменяется по кривой OA . Пусть теперь H уменьшается. Тогда магнитный поток Φ будет изменяться не по той же кривой OA , а по кривой AB , которая расположена выше OA . Изменение магнитного

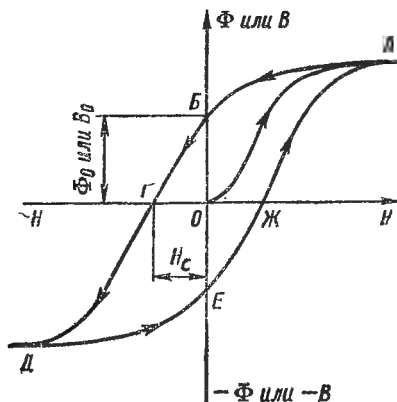


Рис. 39. Кривые намагничивания и перемagnetизации ферромагнитного вещества

потока отстает от изменений намагничивающего поля. Такое отставание называется *магнитным гистерезисом*.

При уменьшении H до нуля сохраняется некоторый остаточный поток Φ_0 и соответствующая ему остаточная магнитная индукция B_0 (отрезок OB). Они характеризуют остаточ-

ный магнетизм. Чтобы полностью размагнитить тело, т. е. добиться $\Phi = 0$, нужно приложить внешнее магнитное поле обратного направления. Тогда при некотором отрицательном значении H_c получим $\Phi = 0$. Величину H_c (отрезок $ОГ$) называют *задерживающей* или коэрцитивной силой. Если продолжать намагничивать тело, то можно довести его до насыщения (точка $Д$), а при уменьшении H опять наблюдается гистерезис. Кривая размагничивания $ДЕ$ не совпадает с кривой намагничивания $ГД$. При $H = 0$ снова наблюдаем остаточный магнетизм (отрезок $ОЕ$), и для его уничтожения необходимо иметь H , соответствующее отрезку $ОЖ$.

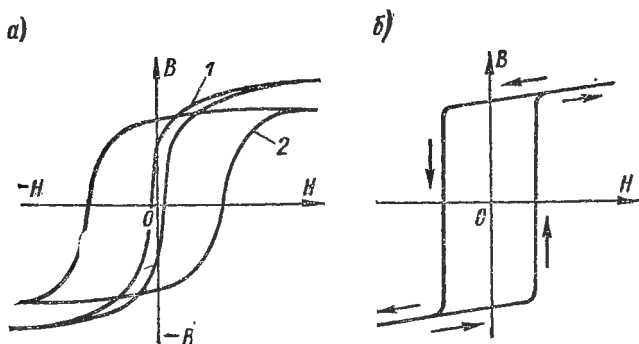


Рис. 40. Петли гистерезиса (а) магнитомягкого (кривая 1) и магнитотвердого (кривая 2) материалов; прямоугольная петля гистерезиса (б)

Таким образом, если осуществлять перемагничивание, т. е. намагничивание и размагничивание, то оно будет происходить по кривой $АБГДЕЖА$, которую принято называть *петлей гистерезиса*. Форма и размеры этой кривой различны для разных ферромагнитных материалов.

Ферромагнитные вещества делятся на две группы. К *магнитомягким материалам*, относятся железо, мягкая (незакаленная) сталь, а также ряд других материалов, которые легко намагничиваются. В них можно получить высокие значения магнитной индукции при сравнительно небольших напряженностях намагничивающего поля. Но зато они легко размагничиваются, и поэтому в них наблюдается очень небольшой остаточный магнетизм. *Магнитожесткие* (или *магнитотвердые*) материалы намагнитить труднее. К ним

относятся закаленная сталь и стальные сплавы, содержащие вольфрам, хром, молибден, алюминий, никель, кобальт и другие металлы. Для их намагничивания необходимо значительно более сильное поле, но зато они характеризуются большей коэрцитивной силой, т. е. их труднее размагнитить. В таких материалах может существовать большой остаточный магнетизм. На рис. 40, а показаны для сравнения гистерезисные петли магнитомягкого (кривая 1) и магнитотвердого (кривая 2) материалов.

В последние годы в радиоэлектронной аппаратуре находят все более широкое применение ферромагнитные материалы с *прямоугольной петлей* гистерезиса. Пример такой петли показан на рис. 40, б. Как видно, ее форма действительно приближается к прямоугольнику. Такие материалы характерны тем, что при изменении напряженности намагничивающего поля в них происходит резкий переход из одного намагниченного состояния в другое, при котором направление магнитного потока изменяется на противоположное.

26. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Очень давно было установлено, что некоторые сорта железной руды обладают способностью притягивать стальные предметы. Это явление называли магнетизмом, так как впервые подобные *естественные магниты* были обнаружены вблизи греческого города Магнезии. Если натереть естественным магнитом кусок закаленной стали, то он сам становится магнитом. На практике широко применяются *постоянные* или *искусственные магниты*, которые изготавливают путем намагничивания стали с помощью электрического тока.

Каждый магнит притягивает ферромагнитные предметы наиболее сильно на своих концах — *полюсах*. Подобно катушке с током, магнит, имеющий возможность свободно вращаться на вертикальной оси, всегда стремится повернуться северным полюсом на север, а южным на юг. На этом основано применение магнитной стрелки в качестве компаса, впервые осуществленное еще в древности.

Взаимодействие магнитов друг с другом всегда происходит так, что *одноименные полюса отталкиваются*, а *разноименные притягиваются*. Следует подчеркнуть, что в этих случаях взаимодействуют не полюса, а магнитные поля обоих магнитов. Северный и южный полюсы имеются у каж-

дого магнита. Отдельно получить один из магнитных полюсов невозможно.

Силовые линии магнитного поля постоянного магнита во внешнем пространстве направлены от северного полюса к южному (это направление выбрано условно). Они являются замкнутыми линиями и продолжаются внутри магнита. По современным воззрениям энергия постоянного магнита сосредоточена в его магнитном поле. Как видно, постоянный магнит по многим своим свойствам подобен катушке с током. На рис. 41 показаны магнитные поля прямого и подковообразного магнитов. Такая их форма применяется

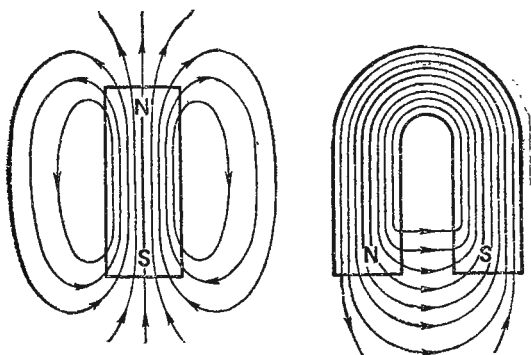


Рис. 41. Магнитные поля прямого и подковообразного магнитов

наиболее часто, но встречаются и магниты другой формы. При изображении магнитных полей надо иметь в виду, что их силовые линии около поверхности ферромагнитных предметов всегда перпендикулярны к этой поверхности.

Для изготовления сильных постоянных магнитов в настоящее время используются особые сорта стали, содержащие значительное количество примесей других металлов. К ним относится, например, алюминий-никелевая сталь, называемая *альни*. Сплав альни с кобальтом получил название *альнико*. Применяются также сплав альни с кремнием, называемый *альниси*, и сплав железа, никеля, алюминия, кобальта и меди — *магник*. Магниты из этих сплавов во много раз легче, чем магниты из обычной стали.

Сплавы для постоянных магнитов характеризуются большой коэрцитивной силой H_c и большой остаточной магнитной индукцией.

В последнее время применяются также *металлокерамические постоянные магниты*. Их изготавливают путем спекания или прессования с последующим обжигом некоторых ферромагнитных порошков.

Постоянные магниты размагничиваются от ударов и толчков, так как при этом нарушается правильный порядок в расположении магнитных полей доменов. Ферромагнитные тела размагничиваются также при нагревании вследствие того, что тепловое движение приводит к нарушению упорядоченного состояния доменов. При высокой температуре кристаллическая структура стали и других

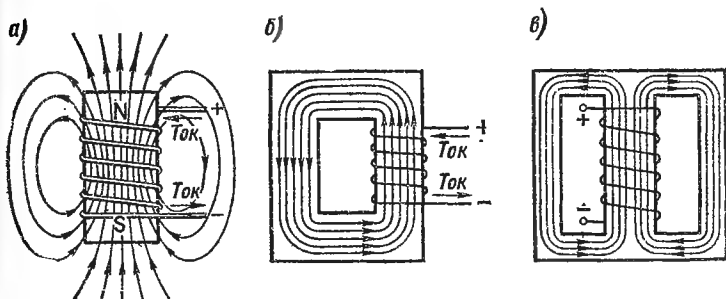


Рис. 42. Электромагниты с прямым и замкнутым сердечниками

ферромагнитных веществ разрушается, и эти вещества вообще не могут быть намагничены. Для сохранения постоянных магнитов в течение долгого времени необходимо, чтобы их магнитный поток не рассеивался в воздухе. С этой целью при хранении магнита полюса замыкают каким-либо предметом из мягкой стали (якорем).

Магнитный поток катушки с током усиливается во много раз, если в катушку вставить сердечник из ферромагнитного материала. Это объясняется тем, что сердечник под действием поля катушки намагничивается и создает добавочный магнитный поток, более сильный, нежели у самой катушки (рис. 42, а). Катушка с ферромагнитным сердечником называется *электромагнитом*. Чаще всего электромагниты имеют сердечники из магнитомягкого материала, например из мягкой стали. Такие сердечники сильно намагничиваются сравнительно небольшим током, но после выключения тока почти полностью размагничиваются. Поэтому электромагниты, как правило, являются временными магнитами; они обладают магнитными свойствами только в течение того вре-

мени, пока в обмотке идет ток. Во многих случаях это свойство электромагнитов является весьма важным.

В некоторых приборах находят применение *поляризованные электромагниты*, имеющие сердечник из магнито-жесткого материала, например, из закаленной стали. При выключении тока они лишь незначительно размагничиваются.

Магнитный поток в электромагните тем сильнее, чем сильнее намагничивающее поле, т. е. чем больше число витков обмотки и ток в ней, а также зависит от конструкции сердечника. Для увеличения магнитного потока нужно, чтобы он по возможности проходил не по воздуху, а по ферромагнитному веществу с большой магнитной проницаемостью. Наиболее сильный магнитный поток возникает в замкнутом сердечнике (рис. 42, б и в). Сердечник и участки пространства, через которые проходит магнитный поток какого-либо электромагнита, принято называть *магнитной цепью*.

При рассмотрении магнитной цепи часто пользуются понятиями *магнитодвижущей силы* (МДС) и *магнитного сопротивления*. Они вводятся на основании следующих соображений.

Магнитный поток выражается формулой

$$\Phi = \mu_a HS,$$

а напряженность поля равна

$$H = Iw/l.$$

Поэтому можно написать

$$\Phi = \mu_a IwS/l.$$

Если разделить числитель и знаменатель на $\mu_a S$, то получим

$$\Phi = Iw \left(\frac{l}{\mu_a S} \right)^{-1}.$$

В этой формуле числитель Iw может быть назван магнитодвижущей (намагничивающей) силой F . Действительно, подобно тому, как в электрической цепи ток пропорционален ЭДС, в магнитной цепи магнитный поток пропорционален МДС. А величина $l/(\mu_a S)$, стоящая в знаменателе, является магнитным сопротивлением R_m , и тогда вся формула может быть названа законом Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = F/R_m.$$

Однако эти представления являются условными. На самом деле магнитный поток не представляет собой движения каких-либо частиц вдоль магнитной цепи. Можно говорить лишь о некотором внешнем сходстве законов магнитной цепи с законами электрической цепи.

Тем не менее, понятие о магнитном сопротивлении оказалось весьма полезным. Значение его тем больше, чем больше длина, а также чем меньше магнитная проницаемость и площадь поперечного сечения сердечника. Выражение для магнитного сопротивления очень напоминает формулу для электрического сопротивления, причем μ_a по аналогии с удельной электрической проводимостью играет роль *удельной магнитной проводимости*.

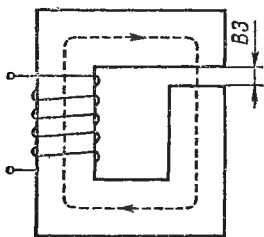


Рис. 43. Магнитная цепь с воздушным зазором (ВЗ)

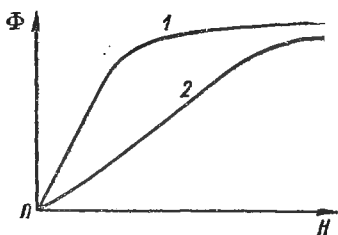


Рис. 44. Кривые намагничивания сердечников без зазора (1) и с зазором (2)

Замкнутый ферромагнитный сердечник имеет малое магнитное сопротивление. Поэтому магнитный поток будет большим, и он проходит именно по сердечнику, так как магнитное сопротивление воздуха во много раз больше. Даже небольшой воздушный зазор в замкнутом сердечнике (рис. 43) резко увеличивает магнитное сопротивление и уменьшает магнитный поток. Формула для магнитного потока при наличии воздушного зазора толщиной l_B примет вид

$$\Phi = Iw / \left(\frac{l}{\mu_a S} + \frac{l_B}{\mu_0 S} \right).$$

В этой формуле в знаменателе добавилось магнитное сопротивление воздушного зазора.

Чтобы получить возможно более сильный магнитный поток, воздушные зазоры в магнитной цепи делают возможно меньшими. Однако иногда в замкнутых сердечниках

устраивают специально воздушные зазоры для того, чтобы сердечник не намагничивался до насыщения. Если площадь поперечного сечения сердечника имеет малое значение или если МДС велика, то может наступить магнитное насыщение, и при изменении тока в обмотке электромагнита магнитный поток уже почти не будет изменяться. Применение в сердечнике воздушного зазора уменьшает магнитный поток и насыщения не наступает. На рис. 44 показаны для сравнения кривые намагничивания сердечника без зазора (кривая 1) и с зазором (кривая 2). При наличии зазора насыщение наступает при гораздо больших значениях МДС. Зазор фактически часто заполняется диамагнитным веществом (например, бумагой, картоном, алюминием, латунью и т. д.). Но это не устраняет его влияния, поскольку подобные вещества имеют $\mu \approx 1$ (как и воздух).

Как указывалось выше, в электромагнитах (за исключением поляризованных) для сердечников используют магнитомягкие материалы. В простейшем случае используется мягкая отожженная сталь. Сердечники во многих электротехнических приборах и аппаратах делают из листовой электротехнической стали. Она представляет собой сплав стали с кремнием.

Широко применяются для сердечников различные железоникелевые сплавы, например, *пермаллой*, у которого магнитная проницаемость имеет начальное значение 10 000—20 000 и максимальное до нескольких сотен тысяч. Примерно такими же значениями μ характеризуется *альсифер* — сплав алюминия с кремнием и железом. Сердечники катушек, предназначенных для переменных токов высокой частоты, делаются из *магнитодиэлектриков*. Они получают прессованием порошка ферромагнитного материала, например карбонильного железа, пермаллоя, альсифера, с каким-либо изолирующим связывающим веществом (шеллак, полистирол и др.).

В последнее время очень широкое применение в радиоэлектронике получили магнитодиэлектрики, называемые *ферритами* (или *оксиферами*), представляющие собой ферромагнитные полупроводники. Они являются керамическими материалами и изготавливаются путем прессования и последующего обжига смеси порошкообразных окислов железа и окислов ряда других металлов (никеля, лития, цинка, марганца, магния). Многие типы ферритов обладают прямоугольной петлей гистерезиса. Достоинства магнитодиэлектриков и ферритов рассматриваются в следующей главе.

К магнитомягким материалам относится также ряд сортов чугуна и стали, применяемых в качестве конструкционного материала для корпусов и крепежных деталей в электрических машинах, аппаратах и приборах. В некоторых случаях конструкционные детали, наоборот, не должны обладать магнитными свойствами и их выполняют из специальных немагнитных (или антимангнитных) чугунов и сталей, у которых магнитная проницаемость близка к единице.

Магнитомягкие материалы применяются также для защиты от действия магнитного поля, т. е. для изготовления *магнитных экранов*. Когда нужно какой-либо прибор защитить от внешнего магнитного поля, то этот прибор заключают в экран из магнитомягкого материала (рис. 45, а).

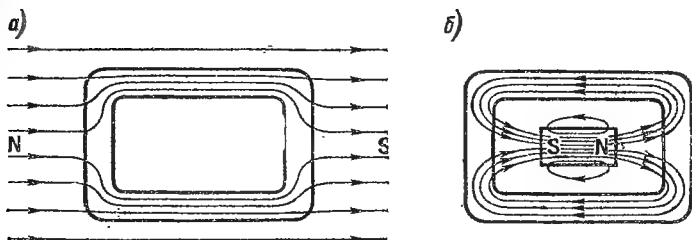


Рис. 45. Ферромагнитные экраны для защиты от магнитного поля

Подобный экран втягивает в себя магнитные силовые линии, которые проходят по экрану и почти не попадают в пространство внутри него. Поэтому внутри экрана поле получается весьма ослабленным.

Магнитный экран может также устранять влияние магнита или электромагнита на окружающие предметы. Для этого источник магнитного поля окружают ферромагнитным экраном. Тогда магнитный поток проходит по экрану и почти не проникает во внешнее пространство за пределами экрана (рис. 45, б). Практически магнитные экраны часто делают из мягкой листовой стали.

Постоянные магниты и электромагниты имеют широкое применение. Они являются основной составной частью большинства громкоговорителей и телефонов. Возникновение и исчезновение магнитного поля электромагнитов при замыкании и размыкании тока используется в электрических

звонках, зуммерах и вибропреобразователях, которые периодически автоматически прерывают электрическую цепь. На подобном же принципе основана работа электромагнитных реле, служащих для включения и выключения электрических цепей.

Принцип устройства и действия реле поясняет следующий пример. Пусть нужно осуществить замыкание электрической цепи с сильным током, находясь на известном удалении от нее. Для этого применяется реле, схема включения которого показана на рис. 46. Цепь сильного тока (управляемая цепь) присоединена к якорю *Я* и к контакту *К*, а обмотка электромагнита *ЭМ* включена в управляющую

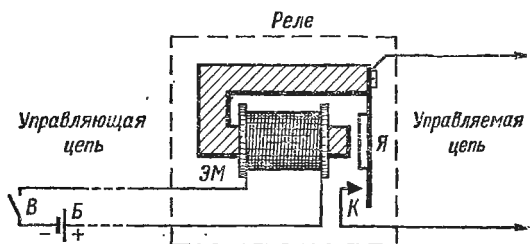


Рис. 46. Принцип устройства и схема включения электромагнитного реле

цепь, имеющую маломощный источник тока, например батарею *Б* и выключатель *В*. Если замкнуть выключатель *В*, то электромагнит притянет якорь и управляемая цепь замкнется. При размыкании управляющей цепи якорь, укрепленный на пружине, отходит от контакта *К*, и управляемая цепь разрывается. Ток в управляющей цепи может быть малым. Поэтому батарея *Б* имеет низкое напряжение и провода этой цепи берутся тонкими. Подобное устройство выгоднее, нежели подводка толстых проводов высокого напряжения управляемой цепи к выключателю *В*.

Реле широко используются в радиоаппаратуре, автоматике и телемеханике, проводной связи, на электростанциях, в различном электрооборудовании. Электромагниты и постоянные магниты также применяются в электрических машинах, трансформаторах, телеграфных аппаратах, электроизмерительных приборах и во многих других устройствах.

27. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

К важным электромагнитным явлениям относится взаимодействие магнитного поля с проводником, по которому идет ток. Такой проводник испытывает со стороны поля действие механической силы F , которая стремится двигать проводник под прямым углом к магнитным силовым линиям (рис. 47). Это объясняется тем, что основное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем тока; в результате возникает механическая сила подобно тому, как и при взаимодействии двух магнитов или двух катушек с током.

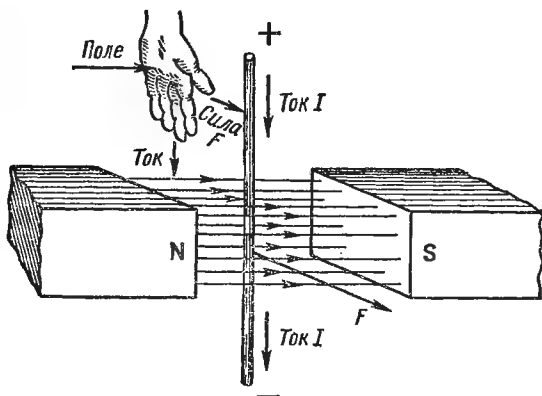


Рис. 47. Действие магнитного поля на проводник с током

Сила F , действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле, тем больше, чем больше магнитная индукция B , ток I в проводнике и длина l той части проводника, которая находится в магнитном поле. Кроме того, сила будет наибольшей, когда проводник расположен перпендикулярно к магнитным силовым линиям. В этом случае сила (в ньютонах) определяется формулой

$$F_{\max} = BIl,$$

в которой B выражена в теслах, l — в метрах, а I — в амперах.

Если проводник расположен вдоль силовых линий, то поле не оказывает на него механического действия. При расположении проводника под некоторым углом α к магнитным силовым линиям сила F меньше, чем $F_{\max}$,

$$F = F_{\max} \sin \alpha.$$

Направление силы зависит от направления тока и магнитных силовых линий. Оно может быть определено по правилу левой руки, которое гласит: если расположить левую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь перпендикулярно к ней, а ток выходил из пальцев, то отогнутый в сторону большой палец покажет направление силы, действующей на проводник (см. рис. 47). Это правило придумано для удобного определения направления действия силы. В действительности, конечно, нет никакой связи между электромагнитными явлениями и левой рукой человека.

Возникновение механической силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле, поясняет рис. 48. На нем изображен случай, когда ток идет от нас (крестик показывает хвост стрелки).

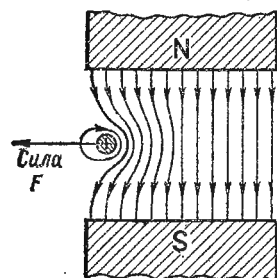


Рис. 48. Проводник с током в магнитном поле

Здесь поле стало сильнее. Справа от проводника магнитные силовые линии основного поля и поля тока совпадают по направлению. Здесь поле стало сильнее. А слева от провода произошло ослабление поля вследствие того, что силовые поля тока и основного поля направлены навстречу друг другу. Учитывая боковой распор магнитных силовых линий и их стремление сократить свою длину,

нетрудно убедиться в появлении механической силы, выталкивающей провод влево, что вполне совпадает с правилом левой руки.

Взаимодействие магнитных полей двух проводников с током также создает механическую силу. Когда направление токов одинаково (рис. 49, а), провода притягиваются друг к другу. Это можно понять, если рассмотреть магнитное поле вокруг таких проводников и учесть стремление силовых линий сократить свою длину. Если же токи имеют противоположные направления, то провода испытывают силы взаимного отталкивания. Это объясняется боковым распором магнитных силовых линий в промежутке между проводами (рис. 49, б).

Сила взаимодействия между проводами тем больше, чем сильнее токи в проводах и чем меньше расстояние между ними, а также зависит от того, как расположены провода. Параллельные провода взаимодействуют с наибольшей

силой F_{max} . Провода, перекрещивающиеся под прямым углом, вообще не взаимодействуют. При каком-либо ином расположении проводов сила взаимодействия меньше F_{max} .

Движение проводников с током в магнитном поле магнита или электромагнита положено в основу устройства

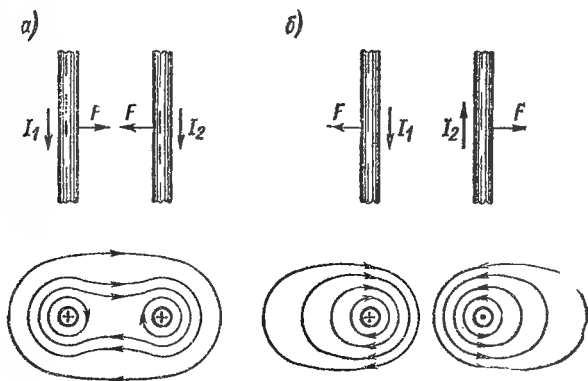


Рис. 49. Взаимодействие двух проводников с током

наиболее распространенных магнитоэлектрических измерительных приборов, электродинамических громкоговорителей и микрофонов, электродвигателей и др. Работу электродвигателей можно также рассматривать как результат взаимодействия проводников с током.

28. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Еще в 1831 г. английский физик М. Фарадей осуществил опыт получения электрического тока с помощью магнитного поля. В катушку, соединенную с чувствительным гальванометром, т. е. прибором, измеряющим малые токи, вставлялся магнит (рис. 50). Гальванометр показывал прохождение тока только при движении магнита внутри катушки. Если магнит неподвижен, ток не возникал.

Ток, возникающий в катушке при движении магнита, называется *индуктированным* или *индукционным* током. Когда магнит вставляют в катушку, этот ток идет в одном направлении, а когда магнит вынимают из катушки, направление тока меняется. Кроме того, направление тока зависит от того, каким полюсом вставляют магнит в катушку.

Индуктированный ток тем больше, чем сильнее магнит, чем больше число витков у катушки, чем быстрее движется магнит и чем меньше сопротивление цепи. Так как последнее может быть различным, то правильнее говорить, что движение магнита в катушке вызывает появление в ней индуктированной электродвижущей силы. А при наличии замкнутой цепи создается ток, который определяется по закону Ома значениями ЭДС и сопротивления цепи.

При движении магнита в катушке провод катушки пересекается магнитными силовыми линиями. Пока магнит находится вне катушки, магнитного поля в ней нет, а когда магнит вдвигается в катушку, магнитное поле в катушке усиливается.

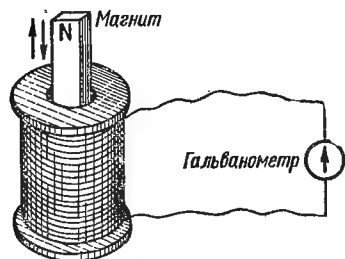


Рис. 50. Явление электромагнитной индукции

Выдвигание магнита, наоборот, вызывает ослабление магнитного поля в катушке. Изменение магнитного поля индуцирует в катушке ЭДС, причем возрастание и убывание магнитного поля создает ЭДС разных направлений.

Итак, явление электромагнитной индукции заключается в том, что изменение магнитного поля вокруг проводника или, что то же самое, пересечение проводника магнитными силовыми линиями вызывает появление электродвижущей силы в этом проводнике.

Для получения индуктированной ЭДС безразлично, будет ли магнит двигаться относительно проводника или, наоборот, проводник будет двигаться относительно неподвижного магнитного поля. Нужно только, чтобы магнитные силовые линии пересекали проводник.

Возникновение индуктированной ЭДС объясняется тем, что в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии, имеются электроны, которые испытывают со стороны магнитного поля действие такой же механической силы, как и в случае, когда проводник с током находится в магнитном поле (см. рис. 47). Под действием этой силы электроны смещаются в одну сторону и на концах проводника получается разность потенциалов, которая тем больше, чем сильнее магнитное поле и чем быстрее движется в нем проводник. Кроме того, ЭДС будет наибольшей, если проводник

движется под прямым углом к магнитным силовым линиям. Если же проводник движется вдоль силовых линий, т. е. не пересекает их, то индуцированная ЭДС равна нулю.

В явлении электромагнитной индукции механическая энергия движения магнита превращается с помощью магнитного поля в электрическую энергию. Рассмотренный случай электромагнитной индукции с некоторыми видоизменениями используется для получения электрической энергии во вращающихся генераторах. Они имеют неподвижный магнит или электромагнит, создающий сильное магнитное поле, в котором находится подвижный электромагнит — *якорь*. При вращении якоря в его обмотке создается индуцированная ЭДС.

Другой случай электромагнитной индукции состоит в том, что возникновение индуцированного тока происходит с помощью другого тока, т. е. электрическая энергия одного тока преобразуется в энергию другого тока. Это осуществляется в трансформаторе, состоящем из двух обмоток I и II (рис. 51). Первичная обмотка питается током от источника и создает вокруг себя магнитное поле. Для усиления этого поля в обмотку вводится ферромагнитный сердечник. На первичную обмотку или рядом с ней наматывается вторичная обмотка, соединенная с потребителем тока.

Индуцированная ЭДС во вторичной обмотке может быть получена при любом изменении тока в первичной катушке, например, при замыкании и размыкании первичной цепи. Замыкание цепи, создающее магнитное поле, равносильно вдвиганию магнита, а размыкание, уничтожающее магнитное поле, равносильно выдвиганию магнита из катушки. В этом случае возникает значительная ЭДС, так как замыкание и размыкание можно совершать значительно быстрее, чем движение магнита.

Направление индуцированной ЭДС определяется правилом, установленным в 1833 г. русским физиком Э. Х. Ленцем: *индуцированная ЭДС всегда имеет такое направление, что создаваемый ею ток своим магнитным полем противодей-*

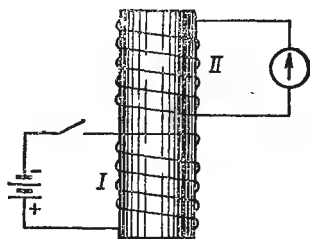


Рис. 51. Трансформация тока с помощью электромагнитной индукции

стает основному магнитному полю, вызвавшему явление индукции.

Поясним это правило на явлении электромагнитной индукции в трансформаторе. Замыкание первичной цепи создает магнитное поле. Индуцированная ЭДС вызовет в замкнутой вторичной цепи такой ток, у которого магнитное поле направлено навстречу первичному полю. При размыкании цепи, когда магнитное поле первичного тока исчезает, индуцированный ток пойдет в обратную сторону. Он создаст магнитное поле, совпадающее по направлению с первичным магнитным полем и стремящееся задержать исчезновение этого поля. Таким образом, при возрастании магнитного поля индуцированная ЭДС имеет одно направление, а при убывании поля ее направление меняется на обратное.

Правило Ленца имеет глубокий физический смысл. Индуцированный ток возникает за счет затраты энергии, например механической. Но расход энергии представляет собой работу, а работа не может совершаться без преодоления сопротивления. Такое сопротивление или противодействие именно и создает своим магнитным полем индуцированный ток.

Для одного витка проволоки индуцированная ЭДС зависит только от скорости изменения магнитного потока внутри витка, т. е. от числа пересечений провода магнитными силовыми линиями в одну секунду. Увеличение числа этих пересечений вызывает соответствующее возрастание ЭДС. Если магнитный поток изменяется в обмотке, имеющей несколько витков, то в каждом витке возникает ЭДС. Все витки соединены последовательно, и поэтому общая ЭДС равна сумме ЭДС отдельных витков, т. е. тем больше, чем больше число витков. Например, если обмотка имеет 50 витков, а скорость изменения магнитного потока такова, что в одном витке индуцируется ЭДС, равная 0,1 В, то полная ЭДС составит 5 В.

Итак, чем быстрее изменяется магнитный поток в обмотке и чем больше в ней витков, тем больше индуцированная ЭДС.

Индуцированная ЭДС, возникающая в одном витке провода, определяется по формуле

$$e = \Delta\Phi / \Delta t,$$

где e — ЭДС, В; $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, Вб; Δt — время, с.

Для катушки, имеющей число витков w , значение e соответственно увеличивается в w раз:

$$e = w \Delta \Phi / \Delta t.$$

Иногда индуктированная ЭДС получается при движении прямолинейного проводника в однородном магнитном поле. Тогда наибольшее значение ЭДС $e_{\max}$ получается при расположении проводника перпендикулярно силовым линиям и его движении под прямым углом к силовым линиям. Эта ЭДС (в вольтах) равна

$$e_{\max} = Bvl.$$

Здесь B — магнитная индукция, Тл; v — скорость движения, м/с; l — длина той части провода, которая находится в магнитном поле, м.

Если провод расположен вдоль силовых линий или движется вдоль них, то ЭДС индукции не возникает. Когда провод расположен под острым углом относительно силовых линий или движется не перпендикулярно к ним, ЭДС получается меньше, чем $e_{\max}$.

Следует отметить, что на основе явления электромагнитной индукции определяется единица магнитного потока *вебер*. Если в одном витке провода магнитный поток изменяется на один вебер в одну секунду, то возникает индуктированная ЭДС в один вольт.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

29. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Постоянным током называется ток, который имеет неизменное значение и направление. В науке и технике важную роль играет также *переменный ток*, который меняет значение и направление определенное число раз в секунду. Кроме того, во многих случаях применяется *пульсирующий ток*, протекающий в одном направлении, как и постоянный ток, но изменяющий свое значение подобно переменному току. Пульсирующий ток, в част-

ности, наблюдается во всех радиотехнических устройствах с электронными приборами.

При переменном токе электроны движутся вдоль провода сначала в одном направлении, затем на момент останавливаются, далее движутся в обратную сторону, опять останавливаются и снова повторяют движение вперед и назад. Иначе говоря, электроны совершают в проводе колебания. Вследствие своей малой скорости электроны при таких колебаниях успевают сделать лишь небольшие перемещения вдоль провода.

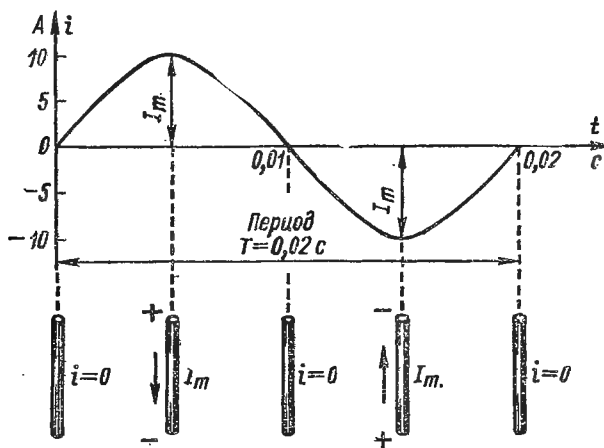


Рис. 52. График переменного синусоидального тока

Если в опытах по электромагнитной индукции попеременно вставлять магнит в катушку и вынимать его или периодически замыкать и размыкать первичную обмотку трансформатора, то индуцированный ток будет переменным током.

Наиболее часто встречается так называемый *синусоидальный* переменный ток, временная диаграмма которого изображена на рис. 52. На этом рисунке по горизонтальной оси отложено время в секундах, а по вертикальной — ток в амперах или других единицах. Ток одного направления считается *положительным*, и его значение откладывают вверх по вертикальной оси, а ток противоположного направления считают *отрицательным*, и его значение откладывают вниз. Изменение тока с течением времени показывает плавная кривая линия, называемая *синусоидой*.

В начальный момент времени ток равен нулю. Затем он увеличивается, сначала быстро, потом медленнее. В какой-то момент нарастание тока прекращается и он достигает наибольшего значения, называемого *амплитудным значением* или *амплитудой*. Для примера на рис. 52 амплитуда тока равна 10 А. Далее ток уменьшается, сначала медленно, потом быстрее и спадает до нуля. После этого направление тока изменяется и все его изменения повторяются. Он снова постепенно растет, сначала быстро, затем медленнее, достигает амплитудного значения и потом уменьшается до нуля. Направление тока опять меняется (на рис. 52 это уже не показано), т. е. он снова идет в первоначальном направлении, и все его изменения повторяются. Совершенно так же меняется ЭДС или напряжение в цепи переменного тока. На рис. 52 внизу стрелками показано движение электронов в проводе при переменном токе для нескольких различных моментов времени.

Значения переменного тока, напряжения или ЭДС в различные моменты времени называют *мгновенными значениями*. Их обозначают буквами i , u , e . Для обозначения амплитудных значений применяется в виде индекса буква m латинского алфавита. Таким образом, амплитуды тока, напряжения и ЭДС обозначаются I_m , U_m , E_m .

Состояния переменного тока в отдельные моменты времени называют его *фазами*. Наиболее характерными являются фазы, т. е. состояния, когда ток имеет наибольшие или нулевые значения.

Пользоваться амплитудными значениями напряжения и тока не всегда удобно. Например, очевидно, что переменный ток с амплитудой 10 А имеет меньшую мощность, чем постоянный ток 10 А. Значение постоянного тока все время равно 10 А, а переменный ток достигает 10 А только в моменты, соответствующие амплитудному значению. В другие моменты ток меньше 10 А и даже доходит до нуля. Возникает вопрос, какой же переменный ток равноценен по мощности постоянному току в 10 А? Или, наоборот, какой постоянный ток равноценен по мощности данному переменному току?

Оказывается, что *синусоидальный переменный ток равноценен по мощности постоянному току, который составляет около 0,7 амплитудного значения переменного тока*. Чтобы иметь более правильное представление о переменном токе, обычно указывают не амплитудное его значение, а значение, приблизительно равное 0,7 амплитуды и назы-

ваемое действующим (или эффективным) значением. Именно действующее значение переменного тока характеризует его мощность, или энергию, или тепловое действие.

Действующее значение переменного синусоидального напряжения также составляет 0,7 его амплитудного значения.

Принято обозначать действующие значения переменного тока, напряжения и ЭДС через I , U , E .

Амплитудные значения всегда приблизительно на 40 % больше действующих значений. Например, если действующее значение переменного тока составляет 10 А, то его амплитудное значение равно 14 А.

Таким образом, действующие и амплитудные значения синусоидального переменного тока связаны между собою следующими формулами:

$$I \approx 0,7I_m \text{ и } I_m \approx 1,4I.$$

Точнее

$$I = I_m/\sqrt{2} \text{ и } I_m = \sqrt{2}I.$$

Подобные же формулы можно написать для напряжения и ЭДС.

Мощность переменного тока вычисляется так же, как и мощность постоянного тока, т. е. используют действующие значения тока и напряжения:

$$P = IU = I^2R = U^2/R.$$

При вычислении мощности по амплитудным значениям надо еще ввести в формулу множитель 0,5, так как $0,7 \cdot 0,7 = 0,49 \approx 0,5$.

$$P = 0,5I_mU_m = 0,5I_m^2R = 0,5U_m^2/R.$$

Когда говорят о напряжении или значении переменного тока, то в большинстве случаев подразумевают действующие значения. Так, например, напряжения в осветительной сети 127 и 220 В являются действующими напряжениями. Отсюда следует, что в сети напряжением 220 В амплитудное значение напряжения составляет примерно 308 В.

Различные электроизмерительные приборы для переменного тока, как правило, градуированы в действующих значениях напряжения или тока.

В § 31 будет дано простейшее математическое обоснование соотношения между амплитудными и действующими значениями.

Движение электронов в проводе сначала в одну сторону, а затем в другую называют одним колебанием переменного тока. За первым колебанием следует второе, затем третье и т. д. При колебаниях тока в проводе вокруг него происходит соответствующее колебание магнитного поля.

Время одного колебания называют периодом и обозначают буквой T . На рис. 52 период для примера взят равным 0,02 с. Период выражают в секундах или в единицах, составляющих доли секунды. К ним относятся: тысячная доля секунды — миллисекунда (мс), равная 10^{-3} с, миллионная доля секунды — микросекунда (мкс), равная 10^{-6} с, и миллиардная доля секунды — наносекунда (нс), равная 10^{-9} с.

Важной величиной, характеризующей переменный ток, является частота. Она представляет собой число колебаний или число периодов в секунду и обозначается буквой f или F . Единицей частоты служит герц, названный в честь немецкого ученого Г. Герца и обозначаемый сокращенно буквами Гц (или Hz). Если в одну секунду происходит одно полное колебание, то частота равна одному герцу. Когда в течение секунды совершается десять колебаний, то частота составляет 10 Гц. Частота и период являются обратными величинами:

$$f = 1/T \text{ и } T = 1/f.$$

При частоте 10 Гц период равен 0,1 с. А если период равен 0,01 с, то частота составляет 100 Гц.

В электрической сети переменного тока частота равна 50 Гц. Ток пятьдесят раз в секунду идет в одну сторону и пятьдесят раз в обратную. Сто раз в секунду он достигает амплитудного значения и сто раз становится равным нулю, т. е. сто раз меняет свое направление при переходе через нулевое значение. Лампы, включенные в сеть, сто раз в секунду притухают и столько же раз вспыхивают ярче, но глаз этого не замечает, благодаря зрительной инерции, т. е. способности сохранять полученные впечатления около 0,1 с.

На рис. 52 графически изображено одно колебание переменного тока, имеющего частоту 50 Гц.

При расчетах с переменными токами пользуются также угловой частотой ω , она равна $2\pi f$ или $6,28f$. Ее следует выражать не в герцах, а в радианах в секунду (радиан — угол в 2π раз меньший, чем 360°).

Переменные токи принято разделять по частоте. Токи с частотой меньше 10 000 Гц называют *токами низкой частоты* (токами НЧ). У этих токов частота соответствует частоте различных звуков человеческого голоса или музыкальных инструментов, и поэтому они иначе называются *токами звуковой частоты* (за исключением токов с частотой ниже 20 Гц, которые не соответствуют звуковым частотам). В радиотехнике токи НЧ имеют большое применение, особенно в радиотелефонной передаче.

Однако главную роль в радиосвязи выполняют переменные токи с частотой более 10 000 Гц, называемые *токами высокой частоты*, или радиочастоты (токи ВЧ). Для измерения частоты этих токов применяют единицы: *килогерц* (кГц), равный тысяче герц, *мегагерц* (МГц), равный миллиону герц, и *гигагерц* (ГГц), равный миллиарду герц. Иначе килогерц, мегагерц и гигагерц обозначают kHz, MHz, GHz. Токи частотой в сотни мегагерц и выше называют токами сверхвысокой или ультравысокой частоты (СВЧ и УВЧ).

Радиостанции работают с помощью переменных токов ВЧ, имеющих частоту от сотен килогерц и выше. В современной радиотехнике для специальных целей применяются токи с частотой в миллиарды герц и имеются приборы, позволяющие точно измерять такие сверхвысокие частоты.

31. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток можно выразить математически с помощью уравнения:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где ω — угловая частота, равная

$$\omega = 2\pi f \text{ или } \omega = 2\pi/T.$$

По этому уравнению можно найти мгновенное значение тока в любой момент времени t . Величина ωt , стоящая под знаком синуса, определяет эти мгновенные значения тока и является *фазовым углом* (или *фазой*). Он выражается в радианах или градусах.

Для переменного синусоидального напряжения или для ЭДС можно написать такие же уравнения:

$$u = U_m \sin \omega t \text{ и } e = E_m \sin \omega t.$$

Во всех приведенных уравнениях вместо синуса можно поставить косинус. Тогда начальному моменту (при $t = 0$) будет соответствовать амплитудная фаза, а не нулевая.

Воспользуемся уравнением переменного тока для определения мощности этого тока и для доказательства соотношения между амплитудными и действующими значениями.

Мгновенная мощность переменного тока, т. е. его мощность в любой момент времени, равна

$$p = i^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t.$$

По формуле $\sin^2 \alpha = (1 - \cos 2\alpha)/2$ представим выражение для мощности в следующем виде:

$$p = 0,5 I_m^2 R (1 - \cos 2\omega t).$$

Полученная формула показывает, что мощность колеблется с двойной частотой. Это нетрудно понять. Ведь мощность при постоянном сопротивлении R определяется только величиной тока i и не зависит от направления тока. Сопротивление нагревается при любом направлении тока. Формула мощности отражает это тем, что i^2 всегда является величиной положительной независимо от знака тока. Следовательно, за один период мощность дважды становится равной нулю (когда $i = 0$) и дважды достигает максимального значения (при $i = I_m$ и $i = -I_m$), т. е. изменяется с удвоенной частотой по сравнению с частотой самого тока.

Найдем теперь среднее значение (т. е. среднее арифметическое) мощности переменного тока за один период. Среднее значение $\cos \omega t$ за один период (или за целое число периодов) равно нулю, так как косинус принимает за один полупериод ряд положительных значений, а за другой полупериод — точно такие же отрицательные значения. Ясно, что среднее арифметическое всех этих значений равно нулю, а выражение $I_m^2 R/2$ является величиной постоянной. Оно и представляет собой среднюю мощность переменного тока за один полупериод или за целое число полупериодов

$$P = I_m^2 R/2.$$

Если представить, что $I_m^2/2$ есть квадрат действующего значения тока I , т. е. написать $I^2 = I_m^2/2$, то отсюда получим:

$$I = \sqrt{I_m^2/2} = I_m/\sqrt{2} \approx I_m/1,4 \approx 0,7 I_m.$$

Приведенные выше соотношения можно проиллюстрировать. На рис. 53 даны графики переменного тока i и его мгновенной мощности p . Рекомендуем читателю самостоятельно построить по точкам последний график. Для этого удобно вычислить значения i^2 на протяжении четверти

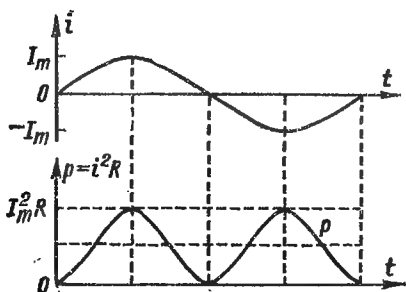


Рис. 53. Изменение мгновенной мощности переменного тока за один период

периода при t , равным 0; $T/12$; $T/6$; $T/4$, т. е. при ωt , равном 0; 30; 60 и 90°. В следующие четверти периода значения i^2 будут повторяться. Графики мощности показывают, что величина p действительно колеблется с удвоенной частотой в пределах от 0 до $I_m^2 R$, а среднее значение мощности, отмеченное жирной штриховой линией, равно $0,5 I_m^2 R$.

32. ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ТОК

В различных радиоэлектронных устройствах, например в аппаратуре с электронными и полупроводниковыми приборами, т. е. в усилителях, выпрямителях, радиоприемниках, генераторах, телевизорах, а также в угольных микрофонах, телеграфных аппаратах и во многих других приборах, широко используются пульсирующие токи и напряжения. Чтобы не повторять рассуждения дважды, будем говорить только о токах, но все, что относится к токам, справедливо и для напряжений.

Пульсирующие токи, которые имеют неизменное направление, но меняют свое значение, могут быть различными. Иногда значение тока изменяется от наибольшего значения до наименьшего, не равного нулю. В других случаях ток уменьшается до нуля. Если цепь постоянного тока прерывается с некоторой частотой, то в течение некоторых

промежутков времени ток в цепи отсутствует. На рис. 54 показаны графики различных пульсирующих токов. На рис. 54, а, б изменение токов происходит по синусоидальной кривой, но эти токи не следует считать синусоидальными переменными токами, поскольку направление (знак) тока не изменяется. На рис. 54, в представлен ток, состоящий из отдельных импульсов, т. е. кратковременных «толчков» тока, разделенных друг от друга паузами большей или меньшей длительности, и его часто называют *импульсным током*. Различные импульсные токи отличаются друг от друга формой и длительностью импульсов, а также частотой их следования.

Пульсирующий ток любого вида удобно рассматривать как сумму двух токов — постоянного и переменного, называемых *слагающими*, или *составляющими*, токами. Всякий пульсирующий ток имеет постоянную и переменную составляющие. Многим это кажется странным. Действительно, ведь пульсирующий ток является током, идущим все время в одном направлении и изменяющим свое значение. Как же можно говорить, что в его составе есть переменный ток, изменяющий свое направление? Однако, если по одному и тому же проводу одновременно пропустить два тока — постоянный и переменный, то оказывается, что в этом проводе будет проходить пульсирующий ток (рис. 55). При этом амплитуда переменного тока не должна превышать значения постоянного тока. Постоянный и переменный токи отдельно по проводу идти не могут. Они складываются в общий поток электронов, имеющий все свойства пульсирующего тока.

Сложение постоянного и переменного токов можно показать графически. На рис. 55 изображены графики постоянного тока, равного 15 мА и переменного тока с амплиту-

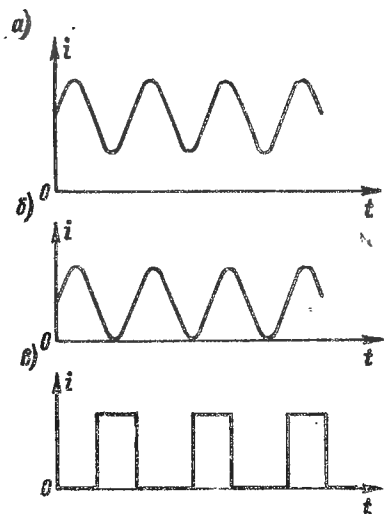


Рис. 54. Графики различных пульсирующих токов

дой 10 мА. Если сложить значения этих токов для отдельных моментов времени, учитывая направления (знаки) токов, то получится график пульсирующего тока, показанный на рис. 55 жирной линией. Этот ток меняется от наименьшего значения 5 мА до наибольшего значения 25 мА. Рассмотренное сложение токов подтверждает справедливость представления пульсирующего тока как суммы постоянного и переменного токов. Правильность такого представления подтверждается еще и тем, что с помощью некоторых приборов можно отделить друг от друга составляющие этого тока.

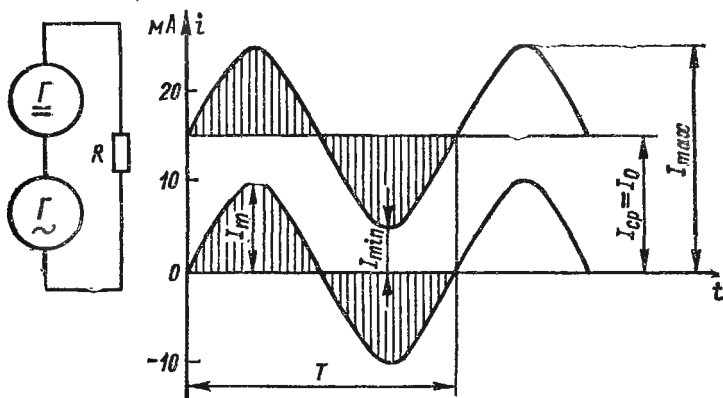


Рис. 55. Получение пульсирующего тока путем сложения постоянного и переменного токов

Следует подчеркнуть, что любой ток всегда можно представить в виде суммы нескольких токов. Например, ток 5 А можно считать суммой токов 2 и 3 А, протекающих в одном направлении, или суммой токов 8 и 3 А, протекающих в разных направлениях, т. е. иначе говоря, разностью токов 8 и 3 А. Нетрудно подобрать и другие комбинации двух или большего числа токов, дающих в сумме ток 5 А. Здесь имеется полное сходство с принципом сложения и разложения сил. Если на какой-либо предмет действуют две одинаково направленные силы, то их можно заменить одной суммарной силой. Силы, действующие в противоположных направлениях, можно заменить одной разностной силой. И, наоборот, данную силу всегда можно считать суммой соответствующих одинаково направленных сил, или разностью противоположно направленных сил.

Постоянный или синусоидальный переменный ток нет необходимости разлагать на составные токи. Если же заменить пульсирующий ток суммой постоянного и переменного токов, то, применяя к этим составляющим токам известные законы постоянного и переменного токов, можно решать многие вопросы и делать необходимые расчеты, относящиеся к пульсирующему току.

Понятие о пульсирующем токе как о сумме постоянного и переменного токов является условным. Нельзя, конечно, считать, что в некоторые промежутки времени по проводу действительно протекают навстречу друг другу постоянный и переменный токи. Никаких двух встречных потоков электронов на самом деле нет. В действительности пульсирующий ток представляет собой единый ток, изменяющий свое значение во времени. Более правильно говорить о том, что пульсирующее напряжение или пульсирующая ЭДС могут быть представлены в виде суммы постоянной и переменной составляющих. Например, на рис. 55 показано как складываются алгебраически постоянная ЭДС одного генератора с переменной ЭДС другого генератора. В результате имеем пульсирующую ЭДС, вызывающую соответствующий пульсирующий ток. Однако можно условно считать, что постоянная ЭДС создает в цепи постоянный ток, а переменная ЭДС — переменный ток, которые, складываясь, образуют пульсирующий ток.

Каждый пульсирующий ток можно характеризовать максимальным и минимальным значениями $I_{\max}$ и $I_{\min}$, а также его постоянной и переменной составляющими. Постоянная составляющая обозначается I_0 . Если переменная составляющая является синусоидальным током, то ее амплитуду обозначают I_m (все эти величины показаны на рис. 55). Не следует смешивать друг с другом I_m и $I_{\max}$. Также не следует называть амплитудой максимальное значение пульсирующего тока $I_{\max}$. Понятие амплитуды принято относить только к переменным токам. Применительно к пульсирующему току можно говорить лишь об амплитуде его переменной составляющей.

Постоянная составляющая пульсирующего тока может быть названа его средним значением $I_{\text{ср}}$, т. е. средним арифметическим. Действительно, если рассмотреть изменения за один период пульсирующего тока, показанного на рис. 55, то хорошо видно следующее: за первый полупериод к току 15 мА добавляется ряд значений переменной составляющей тока, изменяющихся от 0 до 10 мА и

опять до 0, а во время второго полупериода точно такие же значения тока вычитаются из тока 15 мА. Следовательно, ток 15 мА действительно является средним значением. Поскольку ток представляет собой перенос электрических зарядов через поперечное сечение провода, то $I_{\text{ср}}$ есть значение такого постоянного тока, который за один период (или за целое число периодов) переносит такое же количество электричества, как и данный пульсирующий ток.

У синусоидального переменного тока значение $I_{\text{ср}}$ за период равно нулю, так как количество электричества, прошедшее через поперечное сечение провода за один полупериод, равно количеству электричества, которое проходит в обратном направлении за другой полупериод. На графиках токов, показывающих зависимость тока i от времени t , количество электричества, переносимое током, выражается площадью фигуры, ограниченной кривой тока, так как количество электричества определяется произведением it . Для синусоидального тока площади положительной и отрицательной полуволн равны. У пульсирующего тока, показанного на рис. 55, в первый полупериод к количеству электричества, переносимому током $I_{\text{ср}}$, добавляется количество электричества, переносимое переменной составляющей тока (заштрихованная площадь на рисунке). А во второй полупериод точно такое же количество электричества вычитается. В результате за целый период переносится такое же количество электричества, как при одном постоянном токе $I_{\text{ср}}$, т. е. площадь прямоугольника $I_{\text{ср}} T$ равна площади, ограниченной кривой пульсирующего тока.

Таким образом, постоянная составляющая, или среднее значение тока, определяется переносом электрических зарядов через поперечное сечение провода.

Уравнение тока, показанного на рис. 55, очевидно должно быть написано в следующем виде:

$$i = I_0 + I_m \sin \omega t.$$

Мощность пульсирующего тока следует вычислять как сумму мощностей составляющих его токов. Например, если ток, показанный на рис. 55, проходит через резистор сопротивлением R , то его мощность

$$P = I_0^2 R + I^2 R,$$

где $I \approx 0,7 I_m$ — действующее значение переменной составляющей.

Можно ввести понятие о действующем значении пульсирующего тока I_d . Мощность при этом вычисляется обычным способом:

$$P = I_d^2 R.$$

Приравнявая это выражение к предыдущему и сокращая на R , получим:

$$I_d^2 = I_0^2 + I^2 \text{ или } I_d = \sqrt{I_0^2 + I^2}.$$

Такие же соотношения могут быть получены и для напряжений.

33. СДВИГ ФАЗ У ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ

Переменные токи одинаковой частоты могут отличаться друг от друга не только по амплитуде, но и по фазе, т. е. могут быть *сдвинуты по фазе*.

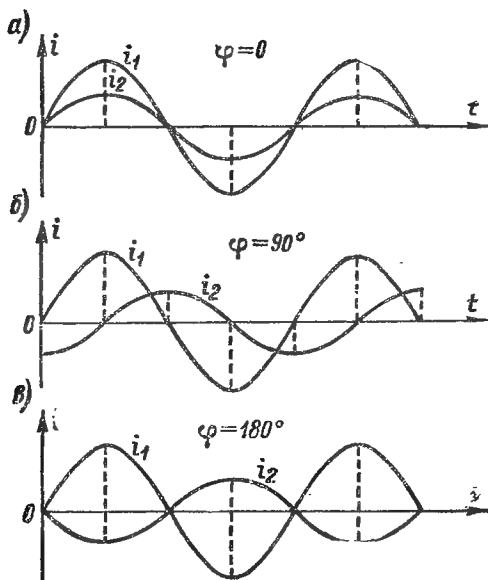


Рис. 56. Различные сдвиги фаз между двумя переменными токами

Если два переменных тока одновременно достигают амплитудных значений и одновременно проходят через нулевые значения, то эти токи совпадают по фазе. В этом случае сдвиг фаз между токами равен нулю (рис. 56, а).

Однако возможны случаи, когда амплитудные (и нулевые) значения данных токов не совпадают друг с другом по времени, т. е. имеется тот или иной сдвиг фаз, не равный нулю. На рис. 56, б показаны токи, сдвинутые по фазе на четверть периода ($T/4$), а на рис. 55, в — на половину периода ($T/2$).

Сдвиг фаз обычно обозначают греческой буквой φ и часто выражают в градусах, считая весь период равным 360° , подобно тому, как один полный оборот соответствует 360° . Таким образом, сдвиг фаз на четверть периода обозначают $\varphi = 90^\circ$, а при сдвиге фаз на половину периода пишут $\varphi = 180^\circ$.

Связь между периодом переменного тока T и углом 360° можно установить из опыта, в котором получают переменную синусоидальную ЭДС при равномерном вращении витка (или катушки) в однородном магнитном поле. В этом случае за один оборот витка, т. е. за время его поворота на угол 360° , ЭДС совершает одно полное синусоидальное колебание. Таким образом, действительно период T соответствует углу 360° .

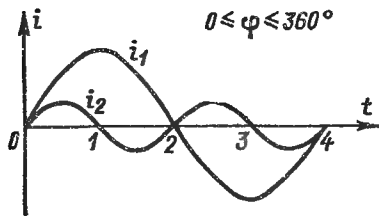


Рис. 57. Переменный сдвиг фаз между токами различной частоты

Это же следует из математического выражения для переменного тока, т. е. из его уравнения, приведенного в § 31. Если переменный ток начал свои изменения от нулевой фазы, когда $t = 0$, $\omega t = 0$ и $\sin \omega t = 0$, то по прошествии одного периода получится

$$t = T; \omega t = \omega T = \frac{2\pi}{T} T = 2\pi.$$

В этот момент фазовый угол составляет 2π радиан или 360° , и, следовательно, $\sin \omega t = \sin 2\pi = \sin 360^\circ = 0$. При изменении угла от 0 до 2π радиан, или до 360° , синус совершает полный цикл своих изменений. Соответственно этому переменный ток совершает одно полное колебание.

Следует помнить, что только токи одной и той же частоты могут иметь вполне определенный сдвиг фаз. При различной частоте токов сдвиг фаз между ними не является постоянным, а все время меняется. Например, для токов i_1 и i_2 , изображенных на рис. 57 и имеющих частоты, отли-

чающиеся друг от друга в два раза, сдвиг фаз в моменты времени, изображенные точками 0, 1, 2, 3, 4, равен соответственно 0; 90; 180; 270; 360°, т. е. на протяжении одного периода тока i_1 значение φ изменяется от 0 до 360°.

Все сказанное о сдвиге фаз между токами относится также к напряжениям и электродвижущим силам. В дальнейшем мы рассмотрим случаи, когда будет существовать сдвиг фаз между напряжением и током.

34. СЛОЖНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ТОКИ

Помимо простых, т. е. синусоидальных переменных токов, часто встречаются *сложные токи*, у которых график изменения тока во времени является не синусоидой, а более сложной кривой. Иначе говоря, у подобных токов закон изменения тока во времени является более сложным, нежели у простого синусоидального тока. Пример такого тока показан на рис. 58.

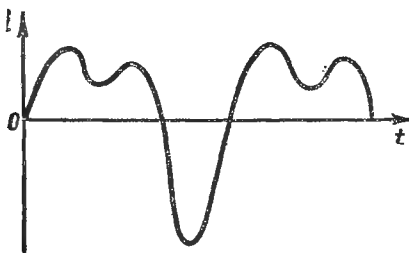


Рис. 58. Сложный несинусоидальный ток

Изучение этих токов основано на том, что *всякий сложный несинусоидальный ток можно считать состоящим из нескольких простых синусоидальных токов, у которых амплитуды различны, а частоты в целое число раз больше частоты данного сложного тока*. Подобное разложение сложного тока на ряд простых токов важно потому, что во многих случаях изучение сложного тока удастся свести к рассмотрению простых токов, для которых в электротехнике выведены все основные законы.

Простые синусоидальные токи, входящие в состав сложного тока, называются гармониками и нумеруются в порядке возрастания их частоты. Например, если сложный ток имеет частоту 50 Гц, то его *первая гармоника*, называе-

мая иначе *основным колебанием*, представляет собой синусоидальный ток с частотой 50 Гц, *вторая гармоника* является синусоидальным током с частотой 100 Гц, *третья гармоника* имеет частоту 150 Гц и т. д. Номер гармоники показывает, во сколько раз ее частота больше частоты данного сложного тока. С повышением номера гармоник амплитуды их обычно уменьшаются, но бывают исключения из этого правила. Иногда некоторые гармоники вообще отсутствуют, т. е. амплитуды их равны нулю. Только первая гармоника имеется всегда.

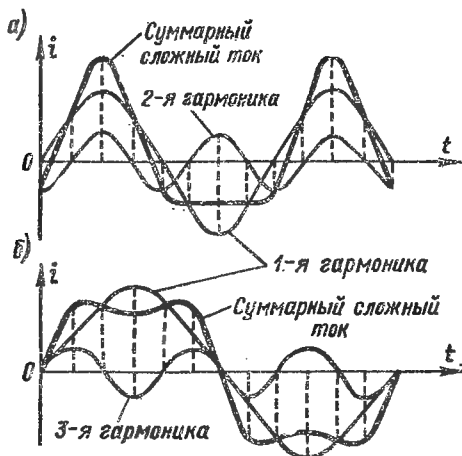


Рис. 59. Сложный переменный ток и его гармоники

В качестве примера на рис. 59, а изображен график сложного тока, состоящего из первой и второй гармоник, и графики этих гармоник, а на рис. 59, б то же показано для тока, состоящего из первой и третьей гармоник. На этих графиках сложение гармоник и получение суммарного тока сложной формы осуществляется сложением вертикальных отрезков, изображающих токи в разные моменты времени, с учетом их знаков (плюс и минус).

Иногда сложный ток, кроме гармоник, имеет в своем составе еще и постоянный ток, т. е. постоянную составляющую. Так как частота постоянного тока равна нулю, то постоянную составляющую можно назвать нулевой гармоникой.

Найти гармоники сложного тока довольно трудно. Этому посвящен специальный раздел математики, называемый гармоническим анализом. Однако по некоторым признакам можно судить о наличии тех или иных гармоник. Например, если положительная и отрицательная полуволны сложного тока одинаковы по форме и максимальному значению, то в таком токе содержатся только одни нечетные гармоники. Пример подобного тока дан на рис. 59, б. Если же положительная и отрицательная полуволны отличаются друг от друга по форме и максимальному значению (рис. 59, а), то это служит признаком наличия четных гармоник (при этом могут быть и нечетные гармоники).

Переменные напряжения и ЭДС сложной формы подобно сложным токам могут быть представлены в виде суммы простых синусоидальных составляющих.

По поводу физического смысла разложения сложных токов на гармоники можно повторить то, что говорилось о пульсирующем токе, который также следует отнести к сложным токам.

В электрических цепях, состоящих из линейных приборов, действие сложного тока всегда можно рассматривать и рассчитывать как суммарное действие составляющих его токов. Однако при наличии нелинейных приборов этот метод имеет более ограниченное применение, так как в решении ряда вопросов он может дать существенные ошибки.

35. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Для рассмотрения многих вопросов, связанных с цепями переменного тока, удобно пользоваться *векторными диаграммами*. Они позволяют изображать переменные синусоидальные токи, напряжения и ЭДС с учетом сдвига фаз между ними гораздо проще, нежели с помощью временных диаграмм, которыми пользовались до сих пор.

Метод векторных диаграмм состоит в следующем. Переменные токи, напряжения и ЭДС изображают в виде векторов, т. е. направленных отрезков, длина которых в выбранном масштабе соответствует амплитуде этих величин. Векторы изображают неподвижными, но подразумевают, что они равномерно вращаются против часовой стрелки с частотой f .

Иначе говоря, угловая скорость вращения векторов равна угловой частоте ω .

При таком равномерном вращении вектора его проекция на вертикальную ось будет изменяться во времени по закону синуса или косинуса (в зависимости от начального положения вектора). Если значения проекции для

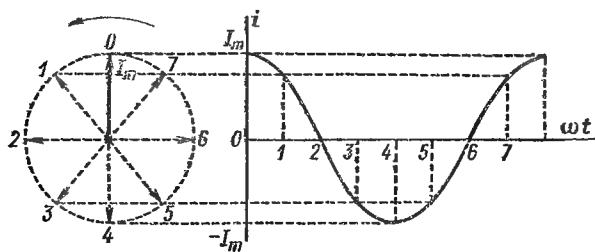


Рис. 60. Соответствие между векторной диаграммой тока и его временной диаграммой

разных моментов времени перенести на временную диаграмму, т. е. отложить отрезки, равные этим проекциям, перпендикулярно оси времени, то линия, соединяющая концы отрезков, будет синусоидой (или косинусоидой). Это показано на рис. 60 для вектора тока на протяжении

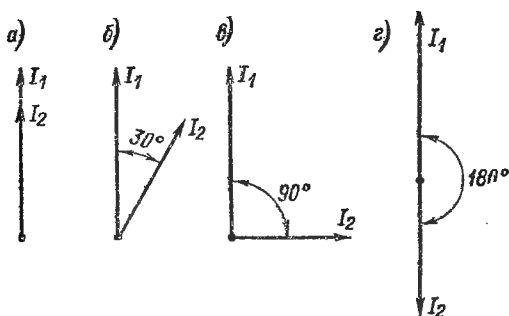


Рис. 61. Векторные диаграммы для токов с различным сдвигом фаз

одного оборота вектора, т. е. одного периода, в моменты времени, соответствующие точкам 0, 1, 2, 3, ..., следующие друг за другом через каждые 45° . Как видно, ток изменяется по косинусоидальному закону. Таким образом, вектор, представленный на рис. 60, соответствует току, определяемому уравнением $i = I_m \cos \omega t$. Если же за на-

чальное положение вектора взять точку b , то вектор будет соответствовать току $i = I_m \sin \omega t$.

Ток, имеющий другую амплитуду, изображается вектором другой длины. А если между токами имеется сдвиг фаз, то векторы таких токов изображают под соответствующим углом друг к другу. На рис. 61 для примера показаны векторные диаграммы двух токов I_1 и I_2 , имеющих различные сдвиги фаз. Токи, показанные на рис. 61, *а*, совпадают по фазе ($\varphi = 0$). Сдвиг фаз на 30° показан на рис. 61, *б*, причем ток I_2 отстает по фазе от тока I_1 , или, иначе говоря, ток I_1 опережает по фазе ток I_2 . Диаграммы этих токов, имеющих сдвиг фаз 90° и 180° , изображены на рис. 61, *в*, *г*.

Как видно, вместо вычерчивания двух синусоид, имеющих фазовый сдвиг, гораздо проще изобразить диаграмму в виде двух векторов, расположенных под углом.

Если нужно сложить несколько токов, то при использовании временных диаграмм приходится складывать мгновенные значения токов для разных моментов времени, чтобы получить кривую суммарного тока. Значительно проще сложить вектора. Для примера на рис. 62 построен вектор суммарного тока I при сложении векторов токов I_1 и I_2 , сдвинутых по фазе на 90° .

Все сказанное о векторных диаграммах токов полностью относится к напряжениям и ЭДС.

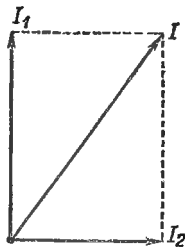


Рис. 62. Векторная диаграмма результирующего тока для сложения двух токов, имеющих сдвиг фаз

36. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Как мы знаем, изменение магнитного поля вокруг проводника создает в этом проводнике индуцированную ЭДС. Если в проводнике протекает изменяющийся по значению ток, то магнитное поле вокруг него также изменяется и в проводнике индуцируется ЭДС. Таким образом, *индуцированная ЭДС возникает в том самом проводнике, в котором происходит изменение тока. Это явление называется самоиндукцией.*

По правилу Ленца индуцированная ЭДС всегда противодействует индуцирующему току. Правило это остается в силе и для явления самоиндукции. Например, при замыкании цепи появляется ток и возникает магнитное поле,

которое индуцирует в проводе ЭДС самоиндукции, направленную навстречу току и противодействующую его нарастанию. Если бы явления самоиндукции не было, то при замыкании цепи ток мгновенно достигал бы значения, определяемого сопротивлением цепи и приложенным напряжением (рис. 63, а), но, вследствие самоиндукции, происходит замедленное нарастание тока (рис. 63, б). Хотя время, в течение которого ток преодолевает противодействие ЭДС самоиндукции, составляет обычно доли секунды, но при огромной скорости электрических процессов такое постепенное нарастание тока имеет существенное значение.

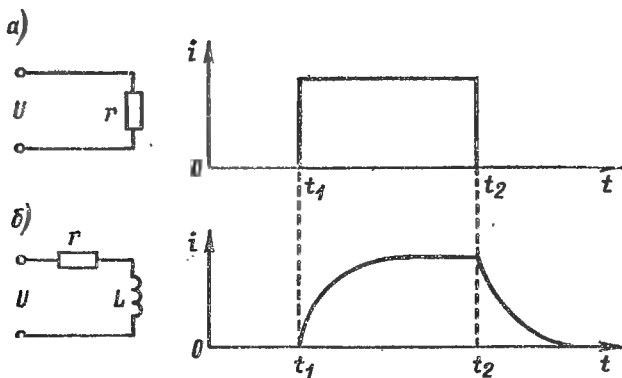


Рис. 63. Нарастание и спад тока при отсутствии (а) и при наличии (б) самоиндукции

t_1 — момент замыкания цепи; t_2 — момент прекращения действия приложенного напряжения

При прекращении действия приложенного напряжения в цепи наблюдается аналогичная картина. Если бы не было самоиндукции, ток прекратился бы мгновенно (рис. 63, а). Но при исчезновении магнитного поля его силовые линии пересекают проводник и возбуждают в нем ЭДС самоиндукции, которая по закону Ленца имеет направление, совпадающее с током. Теперь ЭДС самоиндукции стремится задержать спадание тока, в результате чего ток прекращается не сразу, а постепенно снижается до нуля (рис. 63, б). Иначе говоря, ток некоторое время продолжается за счет действия только одной ЭДС самоиндукции.

Показанное на рис. 63, б постепенное уменьшение тока после прекращения действия приложенного напряжения обусловлено влиянием ЭДС самоиндукции (в этом случае

цепь не размыкается). Если же цепь разомкнуть, то происходит увеличение сопротивления цепи до бесконечности. При этом ток уменьшается до нуля и также возникает ЭДС самоиндукции, которая стремится поддержать существование тока. Эта ЭДС тем больше, чем быстрее происходит размыкание цепи. Обычно размыкание цепи с помощью выключателей или рубильников совершается очень быстро и возникает весьма большая ЭДС самоиндукции. Она может во много раз превысить напряжение источника, питающего цепь. Под действием этой ЭДС в месте размыкания цепи, т. е. между контактами выключателя, проскакивает искра. Таким образом, в цепи некоторое время продолжается ток, проходящий через воздушный промежуток. Раньше этот ток иногда называли экстратокком размыкания. Искра при размыкании является вредной. Она приводит к обгоранию контактов и служит источником помех радиоприему. Большая ЭДС самоиндукции, возникающая при размыкании цепи, может вызвать пробой изоляции.

Следует заметить, что искра, возникающая при размыкании цепи, представляет собой сложное явление. Быстрое увеличение длины воздушного промежутка в месте разрыва цепи приводит к погасанию искры и спаданию тока до нуля. Поэтому при размыкании цепи происходит более сложный процесс, нежели показанный на рис. 63. При размыкании цепи, помимо ЭДС самоиндукции на спадание тока влияет еще скорость размыкания, изменение при этом сопротивления воздушного промежутка, состояние поверхностей размыкающихся контактов и целый ряд других явлений, происходящих в электрической искре.

Явление самоиндукции противодействует любым изменениям тока в цепи. Когда ток нарастает, то ЭДС самоиндукции замедляет, тормозит его нарастание. А когда ток уменьшается, то ЭДС самоиндукции затягивает его спадание. Таким образом, ЭДС самоиндукции всегда сглаживает изменения тока. В этом отношении самоиндукция весьма напоминает инерцию, наблюдающуюся при изменении скорости механического движения у любого тела, обладающего массой.

Как известно, энергия постоянного тока тратится на нагрев провода. Но при возникновении тока имеется еще дополнительная затрата энергии на создание магнитного поля, в котором запасается некоторое количество энергии. При исчезновении тока эта энергия возвращается из магнитного поля обратно в провод и создает в цепи индукти-

рованный ток, продолжающийся после того, как основной ток прекратился.

Вокруг прямолинейного провода образуется небольшой магнитный поток, и поэтому явление самоиндукции у такого провода выражено сравнительно слабо. Значительно сильнее проявляется самоиндукция у катушки. Чем больше число витков и диаметр катушки, тем сильнее явление самоиндукции. Если поместить в катушку сердечник из ферромагнитного материала, то магнитный поток во много раз увеличивается, и явление самоиндукции также станет гораздо сильнее.

Явление самоиндукции в тех или иных проводниках характеризуется *индуктивностью* L . Так как явление самоиндукции состоит в том, что в проводе при изменении тока возникает ЭДС самоиндукции, то индуктивность характеризует именно ЭДС самоиндукции в зависимости от изменения тока. Единица измерений индуктивности называется *генри* (Гн, Н) в честь американского ученого Д. Генри.

Один *генри* есть индуктивность проводника, в котором возникает ЭДС самоиндукции в один вольт при равномерном изменении тока на один ампер в одну секунду. Например, если в какой-либо катушке при равномерном изменении тока на один ампер в одну секунду возникла ЭДС самоиндукции 40 В, то индуктивность этой катушки составляет 40 Гн.

Часто применяются более мелкие единицы индуктивности: *миллигенри* (мГн, мН), и *микрогенри* (мкГн, μ Н), равные соответственно 0,001 и 0,000 001 Гн.

Математически индуктивность связывает ЭДС самоиндукции e_L со скоростью изменения тока, которая равна отношению изменения тока Δi к соответствующему промежутку времени Δt , в течение которого произошло это изменение

$$e_L = -L \Delta i / \Delta t.$$

Чем больше скорость изменения тока $\Delta i / \Delta t$, тем больше ЭДС самоиндукции. Она также возрастает при увеличении индуктивности L . Значение L зависит исключительно от конструкции цепи, например от конструкции катушки. Знак минус в правой части формулы отображает закон Ленца и показывает, что ЭДС самоиндукции всегда противодействует изменениям тока. Действительно, если принять направление тока за положительное, то при возра-

станции тока Δi также положительно, а ЭДС самоиндукции — отрицательна, т. е. она направлена навстречу току и стремится задержать его нарастание. При уменьшении тока Δi отрицательно, но ЭДС самоиндукции положительно. В этом случае она совпадает по направлению с током и стремится поддержать его.

Из приведенной формулы легко определяется единица измерений индуктивности — *генри*. Если $\Delta i = 1$ А, $\Delta t = 1$ с и $e_L = 1$ В, то индуктивность L также равна единице, т. е. одному генри.

Индуктивность катушки тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина и чем больше число витков. При увеличении числа витков в 2, 3, 4 раза индуктивность возрастает соответственно в 4, 9, 16 раз. Такая зависимость объясняется следующим образом. Пусть имеется катушка с некоторым числом витков. Если увеличить число витков вдвое, то магнитный поток при прежнем значении тока станет в два раза больше и изменение магнитного потока при прежнем изменении тока также удвоится. Но тогда в каждом витке будет возникать вдвое большая ЭДС самоиндукции. А так как витков в два раза больше, то ЭДС самоиндукции всей катушки станет в четыре раза больше. Следовательно, индуктивность, действительно, возросла в четыре раза. Рассуждая таким образом, можно доказать, что при увеличении числа витков втрое индуктивность станет в 9 раз больше и т. д.

При уменьшении диаметра провода индуктивность незначительно возрастает. Введение в катушку ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность во много раз. Это увеличение индуктивности зависит от магнитной проницаемости сердечника μ . Чем больше μ , тем больше индуктивность катушки. При этом, если ферромагнитный сердечник является замкнутым, т. е. если магнитный поток идет только по сердечнику, то индуктивность возрастает в μ раз по сравнению с индуктивностью той же катушки без сердечника. Если же сердечник не замкнут и магнитный поток частично проходит по воздуху, то индуктивность увеличивается в меньшей степени.

Зависимость индуктивности катушки от ее конструкции в наиболее общем виде может быть представлена формулой:

$$L = k\mu D w^2 / l,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы катушки и выбранных единиц измерений; μ — маг-

нитная проницаемость сердечника; D — диаметр катушки; w — число витков; l — длина катушки. Более подробно о расчете индуктивности катушек, применяемых в радиотехнической аппаратуре, рассказано дальше.

При последовательном соединении катушек (рис. 64, а) общая индуктивность L равна:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots,$$

где $L_1, L_2, L_3 \dots$ — индуктивности отдельных катушек. Это справедливо при условии, что катушки своими магнитными полями не влияют друг на друга.

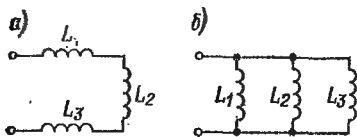


Рис. 64. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение катушек

Параллельное соединение катушек (рис. 64, б) дает уменьшение индуктивности и применяется сравнительно редко. При параллельном соединении для определения

общей индуктивности применяют формулу:

$$1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots$$

Обычно больше двух катушек параллельно не соединяют. В этом случае общая индуктивность равна:

$$L = L_1 L_2 / (L_1 + L_2).$$

При параллельном соединении двух одинаковых катушек, имеющих каждая индуктивность L_1 , получаем:

$$L = L_1/2.$$

37. ИНДУКТИВНОЕ И АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Катушка индуктивности представляет для постоянного тока небольшое сопротивление, зависящее только от длины, диаметра и материала провода. Сопротивление постоянному току иногда называют омическим сопротивлением, но это неудачно, так как можно подумать, что имеются еще какие-то неомические сопротивления, измеряемые не в омах. Но таких сопротивлений нет. Для переменного тока катушка обладает еще дополнительным *индуктивным сопротивлением*. Препятствуя всем изменениям тока, катушка оказывает значительное противодействие прохождению переменного тока. Она замедляет нарастание тока, и поэтому

переменный ток не доходит до того амплитудного значения, какое он мог бы иметь при отсутствии самоиндукции.

Чем выше частота переменного тока, тем быстрее изменяется ток, тем сильнее противодействует самоиндукция этим изменениям и тем больше индуктивное сопротивление. Если уменьшать частоту, то индуктивное сопротивление уменьшается. При частоте, равной нулю (постоянный ток), индуктивное сопротивление также равно нулю, потому что в этом случае явления самоиндукции нет. Таким образом, одна и та же катушка обладает разными сопротивлениями для токов разной частоты.

Итак, чем выше частота и чем больше индуктивность, тем больше индуктивное сопротивление.

Индуктивное сопротивление обозначается x_L , выражается в омах и вычисляется по формуле:

$$x_L = \omega L = 2\pi f L = 6,28 f L,$$

где f — частота, Гц; L — индуктивность, Гн. В этой формуле иногда удобно вместо 6,28 брать 6,25, что дает небольшую ошибку, но упрощает вычисления.

Для примера подсчитаем индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью $L = 2$ мГн = 0,002 Гн для тока с частотой $f = 500$ кГц = 500 000 Гц. Умножая эти величины друг на друга и на 6,28, найдем $x_L = 6280$ Ом. Если частота будет 500 Гц, т. е. в 1000 раз ниже, то индуктивное сопротивление также уменьшится в 1000 раз и будет составлять всего лишь 6,28 Ом.

В табл. 4 приведены значения индуктивного сопротивления для катушек с различной индуктивностью при различных частотах.

Таблица 4

Частота, кГц	Сопротивление катушки, Ом, индуктивностью					
	2 мкГн	20 мкГн	200 мкГн	2 мГн	2 Гн	20 Гн
0,05	0,00063	0,0063	0,063	0,63	628	6280
1	0,0126	0,126	1,26	12,6	12560	125600
200	2,52	25,2	252	2520	$2,52 \cdot 10^6$	$25,2 \cdot 10^6$
1000	12,6	126	1260	12600	$12,6 \cdot 10^6$	$126 \cdot 10^6$
10000	126	1260	12600	126000	$126 \cdot 10^6$	$1260 \cdot 10^6$

Индуктивное сопротивление имеет важную особенность — оно не вызывает расхода энергии. Энергия постоянного тока вследствие наличия сопротивления провода превращается в тепло. У любой катушки провод также

обладает для переменного тока подобным сопротивлением. Энергия переменного тока расходуется на нагрев провода не меньше, чем энергия постоянного тока. Но этот расход энергии определяется сопротивлением провода, которое для переменного тока принято называть *активным сопротивлением*. Оно не связано с индуктивностью. А индуктивное сопротивление характеризует иной процесс. В течение одной четверти периода, когда ток нарастает, энергия тока расходуется на создание магнитного поля и запасается в нем, а в следующую четверть периода, когда ток спадает и магнитное поле уменьшается, энергия магнитного поля снова превращается в энергию тока. Это объясняется тем, что при уменьшении магнитного поля в катушке возникает ЭДС самоиндукции, совпадающая по направлению с током и поддерживающая его. Одну четверть периода катушка работает как потребитель, а следующую четверть периода — как генератор.

Поэтому индуктивное сопротивление называют *реактивным сопротивлением*. Такое название происходит от слова «реакция», т. е. противодействие или обратное действие, и показывает, что энергия, запасаящаяся в магнитном поле катушки, не расходуется, а возвращается полностью обратно в цепь.

В противоположность этому, *активным сопротивлением* является такое сопротивление переменному току, которое характеризует безвозвратную потерю энергии, т. е. превращение энергии тока в другую энергию, например в тепловую.

Индуктивное сопротивление по существу характеризует противодействие ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке при изменении тока. Эта ЭДС уменьшает ток, т. е. по своему действию подобна сопротивлению, но не вызывает дополнительного безвозвратного расхода энергии.

Катушка в цепи переменного тока создает также фазовый сдвиг между напряжением и током. Рассматривая возникновение постоянного тока в цепи с катушкой, видим, что нарастание тока происходит постепенно (см. рис. 63, б), т. е. ток достигает наибольшего значения позже, чем приложенное напряжение. При подключении катушки к генератору переменной ЭДС изменения тока также отстают во времени от изменения напряжения.

Этот процесс удобно рассматривать, считая, что катушка включается в момент, когда напряжение имеет амплитудное значение. Ток не сможет мгновенно возрасти,

а увеличивается постепенно (рис. 65, а), так как его нарастанию противодействует ЭДС самоиндукции. Но пока ток возрастает, напряжение уменьшается. Если активным сопротивлением катушки можно пренебречь по сравнению с индуктивным сопротивлением, то ток достигает амплитудного значения в момент времени 1, когда напряжение уменьшается до нуля. Именно этот случай показан на рис. 65, а.

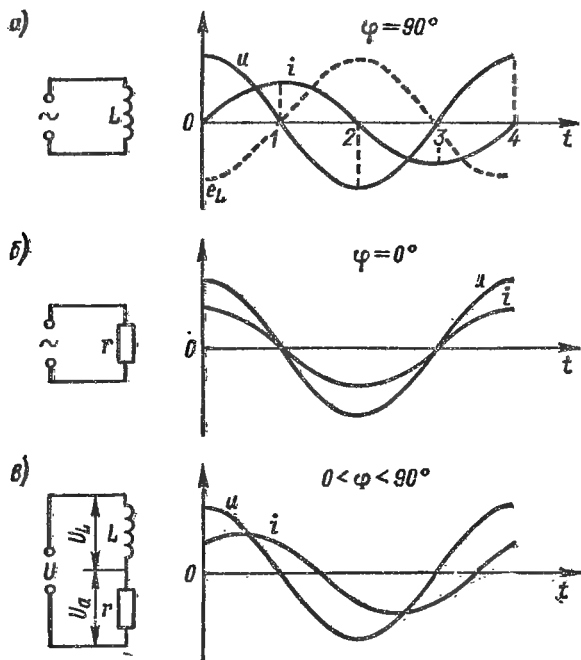


Рис. 65. Влияние индуктивности на фазовый сдвиг между током и напряжением

Одновременно с током в катушке возникает и нарастает магнитное поле, в котором запасается энергия, отдаваемая генератором. Амплитудное значение тока в момент 1 свидетельствует о том, что в магнитном поле катушки накопилась наибольшая энергия, полученная катушкой от генератора в течение первой четверти периода.

Далее ток спадает постепенно, так как его поддерживает ЭДС самоиндукции. Магнитное поле при этом убывает, и накопленная в нем энергия постепенно возвращается в генератор. Напряжение генератора в это время

возрастает, но уже с обратным знаком. В конце второй четверти периода (момент 2) ток уменьшается до нуля. Это значит, что магнитное поле в катушке исчезло и вся энергия вернулась в генератор. Состояние электрической цепи в этот момент такое же, как и в начальный момент: ток равен нулю, а напряжение достигло наибольшего значения, но с обратным знаком. Затем весь процесс снова повторяется, но только в противоположную сторону. Как видно, ток в катушке *отстает по фазе от напряжения на четверть периода, т. е. на 90°* .

На рис. 65, а штриховой линией показана также ЭДС самоиндукции e_L . Она равна напряжению на катушке,

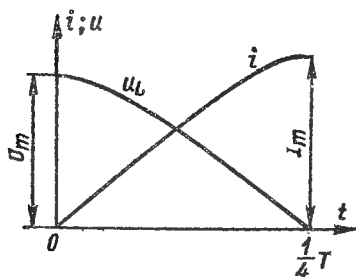


Рис. 66. Ток и напряжение для индуктивного сопротивления

но противоположна ему по фазе. В первую и третью четверти периода, когда ток нарастает, знаки i и e_L различны, так как ЭДС самоиндукции e_L противодействует току, а во вторую и четвертую четверти периода, когда ток уменьшается, знаки i и e_L совпадают, так как ЭДС самоиндукции поддерживает ток.

Если цепь переменного тока обладает чисто активным сопротивлением, то сдвига фаз между током и напряжением не произойдет, т. е. изменения напряжения и тока по времени совпадают друг с другом (рис. 65, б). В последовательной цепи, имеющей индуктивное и активное сопротивления (рис. 65, в), происходит некоторый средний сдвиг фаз между напряжением всей цепи U и током I (этот сдвиг будет меньше 90° , но больше нуля). Чем больше индуктивное сопротивление по сравнению с активным сопротивлением, тем сдвиг фаз ближе к 90° . При этом в самой катушке сдвиг фаз между напряжением на ней U_L и током I равен 90° , а на участке цепи с активным сопротивлением сдвиг фаз между напряжением U_a и током I равен нулю.

Простейший вывод формулы индуктивного сопротивления можно сделать на основе выражения для ЭДС самоиндукции e_L , приведенного в предыдущем параграфе. Учитывая, что $e_L = -u_L$, это выражение запишем так:

$$u_L = L \Delta i / \Delta t.$$

Чтобы получить более точную формулу для x_L , следует взять возможно меньший промежуток времени Δt . На рис. 66 показаны графики u_L и i для одной четверти периода. Из графика видно, что для небольшого промежутка времени, составляющего десятую часть четверти периода, т. е. $T/40$, и соответствующего фазовому углу $360/40 = 9^\circ$, напряжение почти постоянно и равно U_m , а ток изменяется от нуля до значения $I_m \sin 9^\circ$. Так как $\sin 9^\circ = 0,1564$, то $\Delta t = 0,1564 I_m$. Следовательно,

$$U_m \approx L \frac{0,1564 I_m}{T/40} \approx \frac{6,25 L I_m}{T} = 6,25 f L I_m$$

и тогда

$$U_m/I_m = x_L \approx 6,25 f L.$$

Мы получили приближенное выражение для x_L . Более точно методами высшей математики можно доказать, что постоянный коэффициент в этой формуле равен $2\pi = 6,28$.

38. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Вследствие явления самоиндукции в проводнике с переменным током наблюдается так называемый *поверхностный эффект*. Иногда его называют скин-эффектом. Он состоит в том, что переменный ток, в отличие от постоянного тока, идет не по всему поперечному сечению проводника, а только по поверхностному слою, толщина которого уменьшается с повышением частоты.

Поверхностный эффект объясняется следующим образом. Разобьем поперечное сечение провода (рис. 67) на отдельные небольшие участки. Сравним индуктивные сопротивления для токов, проходящих через участок A в центре сечения и такой же участок B около поверхности провода. Для решения вопроса учтем, что магнитное поле существует не только в пространстве вокруг провода, но и внутри

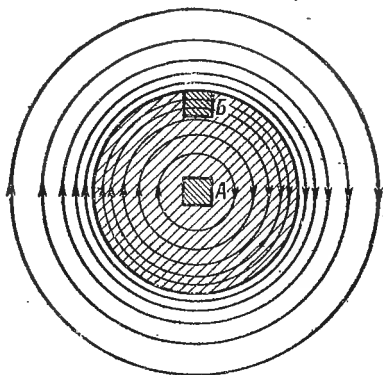


Рис. 67. Магнитное поле вокруг провода с током и внутри него

же участок B около поверхности провода. Для решения вопроса учтем, что магнитное поле существует не только в пространстве вокруг провода, но и внутри

него. Наиболее сильное магнитное поле существует у поверхности провода, а по мере удаления как в окружающее пространство, так и в глубь провода поле ослабевает. На рис. 67 показаны магнитные силовые линии, причем их густота характеризует напряженность поля.

Как видно, ток, проходящий вдоль оси провода (участок А), окружен наибольшим магнитным потоком, который складывается из магнитных потоков вне и внутри провода. Магнитный поток вокруг тока, проходящего через участок В, меньше, так как он представляет собой в основном только магнитный поток вне провода.

При переменном токе, когда магнитный поток изменяется, для тока, проходящего через участок А, создается большая ЭДС самоиндукции. Для этого тока индуктивное сопротивление оказывается больше. Наименьшее индуктивное

сопротивление будет для токов, протекающих у поверхности. Следовательно, большая часть тока пойдет именно по пути наименьшего сопротивления, т. е. по поверхностному слою провода.

Переменный ток вытесняется из центральных частей провода к его поверхности. Рабочее сечение для переменного

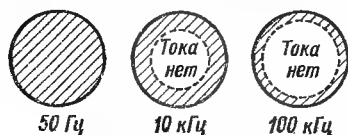


Рис. 68. Явление поверхностного эффекта при различной частоте тока (рабочее сечение провода заштриховано)

ного тока значительно меньше, чем для постоянного тока. В результате активное сопротивление провода для переменного тока всегда больше, чем сопротивление для постоянного тока, и эта разница тем больше, чем выше частота (рис. 68). На частоте 50 Гц поверхностный эффект почти отсутствует, но он проявляется очень сильно на высоких частотах, для которых нередко применяют трубчатый проводник, так как внутренняя часть провода не нужна. Поверхность медного провода для токов высокой частоты иногда покрывают серебром, чтобы поверхностный слой не увеличил своего сопротивления за счет окисления меди. Для увеличения поверхности изредка применяют провод, состоящий из большого числа отдельных тонких проволок, изолированных друг от друга. Благодаря поверхностному эффекту, ток высокой частоты даже при высоком напряжении почти безопасен для человека, так как он проходит по поверхности тела (по коже) и не нарушает работу внутренних органов. Ток высокой частоты при высоких

напряжениях опасен только в случаях, когда он в виде искры может дать ожог.

Нагрев поверхностного слоя проводящих тел токами высокой частоты применяется в медицине для лечения воспалительных процессов, а в машиностроении — для поверхностной закалки стальных изделий.

39. МОЩНОСТЬ И ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мощность цепи, имеющей только активные сопротивления, называется *активной мощностью* P . Ее вычисляют, как обычно, по одной из следующих формул:

$$P = UI = I^2 r = U^2 / r.$$

Активная мощность характеризует безвозвратный (необратимый) расход энергии тока.

В цепях переменного тока имеется гораздо больше причин, вызывающих безвозвратные потери энергии, нежели в цепях постоянного тока. Эти причины следующие:

1. **Нагрев провода током.** Для постоянного тока нагрев является почти единственным видом потерь энергии. А для переменного тока, одинакового по значению с постоянным током, потери энергии на нагрев провода больше вследствие возрастания сопротивления провода за счет поверхностного эффекта. Чем выше частота тока, тем больше сказывается поверхностный эффект и тем больше потери на нагрев провода.

2. **Потери на создание вихревых токов, иначе называемых токами Фуко.** Эти токи индуктируются во всех металлических телах, находящихся в магнитном поле, образованном переменным током. От действия вихревых токов металлические тела нагреваются. Особенно значительные потери на вихревые токи могут наблюдаться в стальных сердечниках. Потери энергии на создание вихревых токов растут с повышением частоты.

3. **Потери на магнитный гистерезис.** Под влиянием переменного магнитного поля ферромагнитные сердечники перемагничиваются. При этом возникает взаимное трение частиц сердечника, в результате которого сердечник нагревается. С повышением частоты потери на магнитный гистерезис увеличиваются.

4. **Потери в твердых или жидких диэлектриках.** В таких диэлектриках переменное электрическое поле вызывает

поляризацию молекул, т. е. на противоположных сторонах молекул возникают равные по значению, но разные по знаку заряды. Поляризованные молекулы под действием поля поворачиваются и при этом испытывают взаимное трение. За счет него диэлектрик нагревается. При повышении частоты его потери возрастают.

5. Потери на утечку в изоляции. Применяемые изоляционные вещества не являются идеальными диэлектриками и в них наблюдаются токи утечки. Иначе говоря, сопротивление изоляции хотя и очень велико, но не равно бесконечности. Этот вид потерь существует и на постоянном токе. При высоких напряжениях возможно даже стекание зарядов в воздух, окружающий провод.

6. Потери на излучение электромагнитных волн. Всякий провод с переменным током излучает электромагнитные волны, причем с возрастанием частоты энергия излучаемых волн резко увеличивается (пропорционально квадрату частоты). Электромагнитные волны безвозвратно уходят от провода, и поэтому расход энергии на излучение волн эквивалентен потерям в некотором активном сопротивлении. В антеннах радиопередатчиков этот вид потерь является полезным расходом энергии.

7. Потери на переход энергии в другие цепи. Вследствие явления электромагнитной индукции часть энергии переменного тока переходит из одной цепи в другую, расположенную рядом. В некоторых случаях, например, в трансформаторах, описанных в § 43, такой переход энергии полезен.

Активное сопротивление цепи переменного тока учитывает все перечисленные виды безвозвратных потерь энергии. Для последовательной цепи можно определить активное сопротивление как отношение активной мощности, т. е. мощности всех потерь к квадрату тока:

$$r = P/I^2.$$

Таким образом, при данном токе активное сопротивление цепи тем больше, чем больше активная мощность, т. е. чем значительнее общие потери энергии.

Мощность в участке цепи с индуктивным сопротивлением называется *реактивной мощностью* Q . Она характеризует реактивную энергию, т. е. энергию, не расходующуюся безвозвратно, а лишь временно запасующуюся в магнитном поле. Для отличия от активной мощности реактивную мощность измеряют не ваттами, а вольт-ампе-

рами реактивными (вар или var). В связи с этим ее называли раньше безваттной. Реактивная мощность определяется по одной из формул:

$$Q = IU_L = I^2 x_L = U_L^2 / x_L,$$

где U_L — напряжение на участке с индуктивным сопротивлением x_L ; I — ток в этом участке.

Для последовательной цепи с активным и индуктивным сопротивлениями введено понятие полной мощности S . Она определяется произведением полного напряжения цепи U на ток I и выражается в вольт-амперах (В·А или V·A)

$$S = UI.$$

Мощность в участке с активным сопротивлением подсчитывается по одной из приведенных выше формул или по формуле:

$$P = UI \cos \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между напряжением U и током I .

Множитель $\cos \varphi$ является *коэффициентом мощности*. Часто его называют «*косинусом фи*». Коэффициент мощности показывает, какую долю полной мощности составляет активная мощность:

$$\cos \varphi = P/S.$$

Значение $\cos \varphi$ может изменяться от нуля до единицы в зависимости от соотношения между активным и реактивным сопротивлением. Если в цепи имеется только одно реактивное сопротивление, то $\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0$, $P = 0$ и мощность в цепи чисто реактивная. Если же имеется только активное сопротивление, то $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$ и $P = S$, т. е. вся мощность в цепи чисто активная.

Чем меньше $\cos \varphi$, тем меньшая доля полной мощности является активной мощностью и тем больше реактивная мощность. Но работа тока, т. е. переход его энергии в какой-либо другой вид энергии, характеризуется лишь активной мощностью. А реактивная мощность характеризует энергию, совершающую колебание между генератором и реактивным участком цепи. Для электрической сети она является бесполезной и даже вредной. Следует отметить, что в радиотехнике реактивная мощность в ряде случаев является необходимой и полезной. Например, в колебательных контурах, которые широко применяются

в радиотехнике и служат для получения электрических колебаний, мощность этих колебаний является почти чисто реактивной.

Как видно, коэффициент мощности $\cos \varphi$ служит важным показателем степени использования полной мощности, развиваемой генератором переменной ЭДС. Надо обратить особое внимание на то, что при $\cos \varphi < 1$ генератор должен создавать напряжение и ток, произведение которых больше активной мощности. Например, если в электрической сети активная мощность составляет 1000 кВт и $\cos \varphi = 0,8$, то полная мощность будет равна:

$$S = P / \cos \varphi = 1000 / 0,8 = 1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Предположим, что в данном случае активная мощность получается при напряжении 100 кВ и токе 10 А. Однако генератор должен создавать напряжение 125 кВ, чтобы полная мощность была $S = 125 \cdot 10 = 1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Ясно, что применение генератора на более высокое напряжение невыгодно, а кроме того, при более высоком напряжении придется улучшить изоляцию проводов во избежание увеличения утечек или возникновения пробоя. Это приведет к удорожанию электрической сети.

Необходимость повышения напряжения генератора из-за наличия реактивной мощности характерна для последовательной цепи с активным и реактивным сопротивлением. Если же имеется параллельная цепь с активной и реактивной ветвями, то генератор должен создавать больший ток, чем нужно при одном активном сопротивлении. Иначе говоря, генератор нагружается дополнительным реактивным током. Например, для рассмотренных выше значений $P = 1000 \text{ кВт}$, $\cos \varphi = 0,8$ и $S = 1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ при параллельном соединении генератор должен при напряжении 100 кВ давать ток не 10 А, а 12,5 А. В этом случае не только генератор должен быть рассчитан на больший ток, но и провода электрической линии, по которой будет передан этот ток, придется взять большей толщины, что также увеличит стоимость линии. Если же в линии и у обмоток генератора будут провода, рассчитанные на ток 10 А, то ясно, что ток 12,5 А вызовет в этих проводах повышенный нагрев.

Таким образом, хотя дополнительный реактивный ток переносит от генератора в реактивные нагрузки и обратно реактивную энергию, все же он создает лишние потери энергии за счет активного сопротивления проводов.

В существующих электрических сетях участки с реактивным сопротивлением бывают включены как последовательно, так и параллельно с участками, имеющими активное сопротивление. Поэтому генераторы должны развивать повышенное напряжение и повышенный ток, чтобы создавать, помимо полезной активной мощности, еще и реактивную.

Из сказанного ясно, какое большое значение для электрификации имеет повышение значения $\cos \varphi$. Понижение его вызывается включением в электрическую сеть реактивных нагрузок. Например, электродвигатели или трансформаторы, работающие вхолостую или не полностью нагруженные, создают значительную реактивную нагрузку, так как они имеют обмотки с довольно большой индуктивностью. Для повышения $\cos \varphi$ важно, чтобы двигатели и трансформаторы работали с полной нагрузкой. Существует ряд способов для повышения $\cos \varphi$, однако их рассмотрение выходит за рамки нашей книги.

В заключение отметим, что все три мощности связаны друг с другом следующим соотношением:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

т. е. полная мощность не является арифметической суммой активной и реактивной мощностей. Принято говорить, что мощность S является геометрической суммой мощностей P и Q .

40. ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При последовательном соединении приборов с активным и индуктивным сопротивлениями (рис. 69) полное сопротивление цепи нельзя находить арифметическим суммированием. Если обозначить полное сопротивление через z , то для его определения служит формула:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

Как видно, полное сопротивление является геометрической суммой активного и реактивного сопротивлений. Так, например, если $r = 30$ Ом и $x_L = 40$ Ом, то $z = \sqrt{30^2 + 40^2} = \sqrt{900 + 1600} = \sqrt{2500} = 50$ Ом, т. е. z получилось меньше, чем $r + x_L = 30 + 40 = 70$ Ом.

Для упрощения расчетов полезно знать, что если одно из сопротивлений (r или x_L) превосходит другое в 10 или

более раз, то можно пренебречь меньшим сопротивлением и считать, что z равно большему сопротивлению. Ошибка весьма невелика. Например, если $r = 1$ Ом и $x_L = 10$ Ом, то $z = \sqrt{1^2 + 10^2} = \sqrt{101} \approx 10,05 \approx 10$ Ом. Ошибка лишь 0,5 % вполне допустима, так как сами сопротивления r и x бывают известны с меньшей точностью.

Итак, если $r \ll x_L$, то $z \approx x_L$, а если $x_L \ll r$, то $z \approx r$.

При параллельном соединении ветвей, имеющих активные и реактивные сопротивления (рис. 70), расчет полного сопротивления удобнее де-

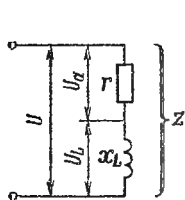


Рис. 69. Последовательное соединение участков цепи с активным и индуктивным сопротивлением

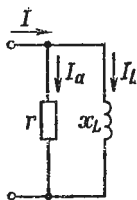


Рис. 70. Параллельное соединение участков цепи с активным и индуктивным сопротивлением

лать с помощью активной проводимости $g = 1/r$ и реактивной проводимости $b = 1/x_L$. Полная проводимость цепи y равна геометрической сумме активной и реактивной проводимостей:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}.$$

А полное сопротивление цепи является величиной, обратной y ,

$$z = 1/y.$$

Если выразить проводимость через сопротивления, то нетрудно получить следующую формулу:

$$z = rx_L / \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

Эта формула напоминает известную формулу

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2),$$

но только в знаменателе стоит не арифметическая, а геометрическая сумма сопротивлений ветвей.

Пример. Найти полное сопротивление, если параллельно соединены приборы, имеющие $r = 30$ Ом и $x_L = 40$ Ом.

Решение.

$$z = 30 \cdot 40 / \sqrt{30^2 + 40^2} = 1200 / \sqrt{2500} = 1200 / 50 = 24 \text{ Ом}.$$

При расчете z для параллельного соединения можно для упрощения пренебречь большим сопротивлением, если оно превосходит меньшее в 10 и более раз. Ошибка не будет превышать 0,5 %.

Следовательно, если $r \gg x_L$, то $z \approx x_L$, а если $x_L \gg r$, то $z \approx r$.

Принцип геометрического сложения применяется для цепей переменного тока также в случаях, когда надо складывать активные и реактивные напряжения или токи. Для последовательной цепи по рис. 69 складываются напряжения:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

При параллельном соединении (рис. 70) складываются токи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_L^2}.$$

Если же последовательно или параллельно соединены приборы, имеющие только одни активные или только одни индуктивные сопротивления, то сложение сопротивлений или проводимостей и соответствующих напряжений или токов, а также активных или реактивных мощностей производится арифметически.

При любой цепи переменного тока закон Ома можно писать в следующем виде:

$$I = U/z,$$

где z — полное сопротивление, вычисляемое для каждого случая соединения так, как это было показано выше.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ для любой цепи равен отношению активной мощности P к полной S . При последовательном соединении это отношение можно заменить отношением напряжений или сопротивлений:

$$\cos \varphi = U_a/U = Ir/Iz = r/z.$$

При параллельном соединении получим:

$$\cos \varphi = I_a/I = U_g/U_y = g/y = 1/r : 1/z = z/r.$$

Вывод основных расчетных формул для последовательной цепи переменного тока, имеющей активное и индуктивное сопротивление, можно сделать следующим образом.

Проще всего построить векторную диаграмму для последовательной цепи (рис. 71). На этой диаграмме показаны

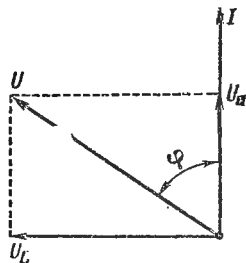


Рис. 71. Векторная диаграмма для последовательной цепи с активным и индуктивным сопротивлением

вектор тока I , вектор напряжения U_a на активном участке, совпадающий по направлению с вектором I , и вектор напряжения U_L на индуктивном сопротивлении. Это напряжение опережает ток на 90° (напомним, что векторы надо считать вращающимися против часовой стрелки). Полное напряжение U представляет собой суммарный вектор, т. е. диагональ прямоугольника со сторонами U_a и U_L . Иначе говоря, U есть гипотенуза, а U_a и U_L — катеты прямоугольного треугольника. Отсюда следует, что $U^2 = U_a^2 + U_L^2$, т. е. что напряжения на активном и реактивном участках складываются геометрически.

Разделив обе части равенства на I^2 , найдем формулу для сопротивлений:

$$U^2/I^2 = U_a^2/I^2 + U_L^2/I^2 \text{ или } z^2 = r^2 + x_L^2.$$

41. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Каждая катушка обладает активным и индуктивным сопротивлениями; в большинстве случаев у катушек индуктивное сопротивление значительно больше активного. Приближенно считают, что катушка имеет одно индуктивное сопротивление. Применяемые в радиоаппаратуре катушки могут быть предназначены для токов низкой или высокой частоты.

Катушки для токов низкой частоты обычно имеют ферромагнитный (например, стальной) сердечник и большое число витков. Их индуктивность достигает единиц, десятков и даже сотен генри. Стальные сердечники таких катушек делаются не сплошными, а из тонких пластин, изолированных друг от друга с помощью бумаги или лака. Эта изоляция служит для уменьшения вихревых токов в сердечнике. Дело в том, что переменный магнитный поток индуцирует ЭДС в самом сердечнике, так как последний является проводником. Если сердечник сплошной, то ЭДС создает в нем довольно большие токи, которые нагревают его и вызывают значительные потери энергии. В сердечнике из отдельных изолированных друг от друга пластин потери на вихревые токи уменьшаются во много раз.

Это объясняется тем, что площадь поперечного сечения у каждой пластинки во много раз меньше, чем у сплошного сердечника. В такое же число раз в каждой пластинке уменьшается индуцированная ЭДС (ведь пластинка пронизывается соответственно меньшим магнитным потоком)

и увеличивается сопротивление для вихревого тока. Вследствие этого сам вихревой ток во много раз уменьшается. Например, если сердечник составить из десяти пластин, то, по сравнению со сплошным сердечником, в каждой пластинке ЭДС станет в 10 раз меньше, а сопротивление примерно в 10 раз больше. Тогда ток в пластине будет в 100 раз меньше. Мощность потерь в одной пластине получается в 1000 раз меньше, а общая потерянная мощность в десяти пластинах будет в 100 раз меньше, чем в сплошном сердечнике. Этот примерный расчет дает представление о том, что мощность потерь на вихревые токи уменьшается пропорционально квадрату числа пластин.

Для уменьшения вихревых токов стараются увеличить удельное сопротивление материала сердечника. С этой целью в трансформаторную сталь добавляют кремний и другие вещества или применяют специальные ферромагнитные сплавы, например альсифер. Помимо потерь на вихревые токи в сердечнике происходят еще потери на перемагничивание (магнитный гистерезис). Они имеют наименьшее значение в сердечниках из специальных ферромагнитных материалов.

Катушки для токов высокой частоты часто изготавливаются без сердечника и имеют число витков от единиц до десятков или сотен. Их индуктивность сравнительно невелика: от долей или единиц микрогенри до нескольких миллигенри. Большое распространение получили высокочастотные катушки с сердечниками различной формы из магнитодиэлектриков, создающими весьма малые потери при высоких частотах. Увеличивая индуктивность, такие сердечники позволяют уменьшить размеры катушек и количество провода для них. В результате значительно уменьшается активное сопротивление катушек. Особенно хорошие результаты достигнуты с сердечниками из ферритов, которые обладают высокой магнитной проницаемостью. Они, в частности, применяются для так называемых магнитных антенн и отклоняющих систем телевизионных трубок. Сердечники из магнитодиэлектриков успешно используются также и в катушках для токов низкой частоты.

Высокочастотные катушки применяются в колебательных контурах радиоприемников и радиопередатчиков, а также в качестве дросселей для создания большого индуктивного сопротивления токам той или иной частоты. Дроссели высокой частоты даже при сравнительно небольших индуктивностях (порядка долей или единиц миллигенри) имеют

достаточно высокое индуктивное сопротивление. Широко используются также дроссели низкой частоты (рис. 72). В них для получения значительной индуктивности применяют замкнутые сердечники из пластин трансформаторной стали или специального ферромагнитного материала. Обмотка таких дросселей имеет число витков от сотен до десятков тысяч.

Катушки для токов высокой частоты при небольшом числе витков наматы-

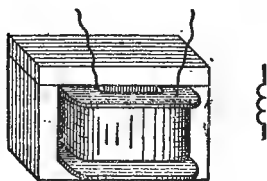


Рис. 72. Дроссель низкой частоты и его изображение на схемах

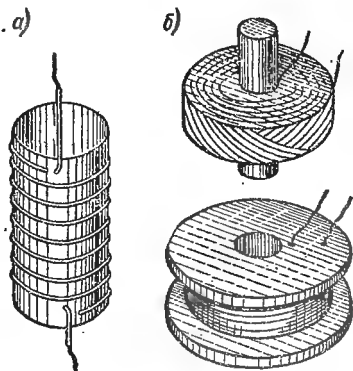


Рис. 73. Однослойная (а) и многослойные (б) катушки для токов высокой частоты

вают на каком-либо цилиндрическом изолирующем каркасе в один слой (рис. 73, а). При значительном числе витков применяют многослойную обмотку (рис. 73, б). Если катушка имеет всего несколько витков, то ее иногда делают без всякого каркаса из толстого медного провода или трубки.

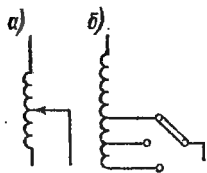


Рис. 74. Способы изменения индуктивности катушек

Катушки с переменной индуктивностью бывают различной конструкции. По обмотке катушки может двигаться подвижной контакт, как в реостате (рис. 74, а). Нередко делают катушку с отводами и с помощью переключателя ступенями или скачками изменяют индуктивность (рис. 74, б).

Плавное изменение индуктивности достигается с помощью *вариометра*. Он представляет собой две катушки, соединенные последовательно, одна из которых неподвижна, а другая может перемещаться относительно первой катушки. Чаще всего подвижная катушка, называемая *ротором*, может вращаться на оси внутри неподвижной катушки, называемой *статором* (рис. 75).

Если катушки вариометра расположены под прямым углом друг к другу (рис. 75, а), то полная индуктивность вариометра равна сумме индуктивностей обеих его катушек. При повороте подвижной катушки на 90° от этого положения в ту или другую сторону направления токов в катушках либо одинаковы, либо противоположны друг другу (рис. 75, б и в). В этих положениях влияние катушек друг на друга будет наибольшим. В первом случае полная индуктивность увеличится за счет того, что магнитные поля катушек складываются, а во втором случае полная индуктивность уменьшится, потому что магнитные поля взаимно ослабляют друг друга. Таким образом, при вращении ротора на 180° из одного крайнего положения в другое индуктивность плавно изменяется от наибольшего до наименьшего значения.

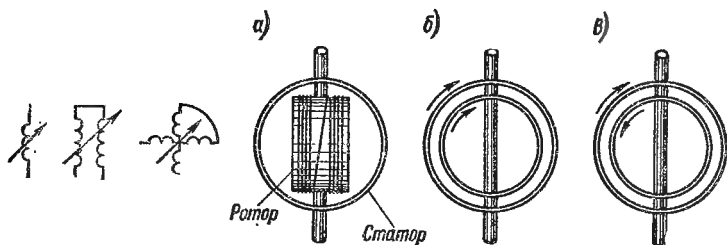


Рис. 75. Устройство вариометра с подвижной катушкой и его изображение на схемах

В последнее время широко применяются *ферровариометры*, в которых индуктивность катушки изменяется от перемещения внутри нее сердечника из магнитодиэлектрика или феррита. Индуктивность высокочастотной катушки изменяется также путем перемещения внутри или около нее стержня или пластинки из диамагнитного хорошо проводящего металла, например, меди, алюминия, латуни. Изменение индуктивности в этом случае объясняется тем, что в металле индуцируются вихревые токи, которые создают свое магнитное поле, направленное навстречу полю катушки (в соответствии с законом Ленца). Результирующее поле становится слабее и индуктивность уменьшается. Иногда в качестве такого настраивающего элемента применяют короткозамкнутый виток провода.

Во многих случаях бывает необходимо защитить катушку от влияния внешних магнитных полей или устранить влияние магнитного поля самой катушки на расположенные

рядом другие детали. Для этого катушку помещают в экранирующий чехол в виде цилиндрической или прямоугольной коробки из листового металла. При низких частотах для экрана применяют ферромагнитные материалы, например мягкую сталь, а для высоких частот экраны делают из хорошо проводящих диамагнитных металлов (чаще всего из алюминия). В таком экране (рис. 76) магнитный поток катушки Φ_L индуцирует ток, который по закону Ленца создает свой магнитный поток Φ_3 , противоположного направления, уничтожающий почти полностью основной магнитный поток за пределами экрана. Надо иметь в виду, что

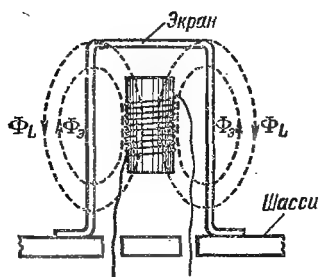


Рис. 76. Катушка с экраном из диамагнитного металла

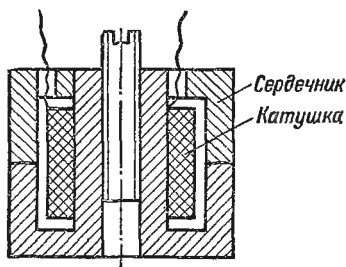


Рис. 77. Катушка с замкнутым ферромагнитным сердечником

экран уменьшает индуктивность катушки и увеличивает ее активное сопротивление. Для уменьшения этого нежелательного влияния экран следует располагать не слишком близко к катушке.

Магнитное поле катушки без экрана рассеивается в сравнительно большом пространстве вокруг катушки, если у нее сердечник незамкнутый или вообще нет сердечника. При наличии замкнутого сердечника рассеивание магнитного поля значительно меньше. Оно становится совсем малым, если внешняя часть замкнутого сердечника полностью охватывает со всех сторон катушку (рис. 77). Сердечники такого типа из магнитоэлектрика или феррита нередко встречаются у высокочастотных катушек.

42. ПРОСТЕЙШИЙ РАСЧЕТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК

Индуктивность однослойной катушки удобно рассчитывать по формуле

$$L = \frac{0,01 D \omega^2}{(l/D) + 0,44},$$

где D и l — соответственно диаметр и длина намотки в сантиметрах (рис. 78, а); w — число витков.

Пример. Найти индуктивность катушки, имеющей $D = 2$ см, $l = 4$ см и $w = 50$.

$$L = \frac{0,01 \cdot 2 \cdot 50^2}{4/2 + 0,44} = \frac{50}{2,44} = 20,5 \text{ мкГн.}$$

Обычно бывает известно необходимое значение индуктивности и по заданным размерам катушки l и D находим число витков:

$$w = 10 \sqrt{L(l/D + 0,44)/D}.$$

Затем определяется диаметр провода с изоляцией

$$d_{\text{из}} = l/w.$$

Размеры катушки рекомендуются такие, чтобы отношение l/D было в пределах от 0,2 до 2. Значение отношения, при котором активное сопротивление катушки будет наименьшим, равно 0,4.

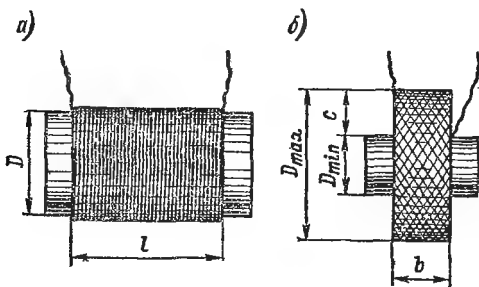


Рис. 78. Расчетные размеры однослойной и многослойной катушек

Пример. Найти число витков катушки и диаметр провода, если $l = 3$ см, $D = 2$ см и $L = 10$ мкГн.

Решение: $w = 10 \sqrt{10(1,5 + 0,44)/2} = 33$ витка; $d_{\text{из}} = 30/33 = 0,9$ мм.

Если провод будет тоньше, то его надо наматывать с промежутками между витками, чтобы длина намотки была 3 см.

Индуктивность многослойных катушек определяется формулой

$$L = \frac{0,08D^2w^2}{3D + 9b + 10c},$$

где D , b и c — соответственно средний диаметр, длина и толщина намотки, см; w — число витков (рис. 78, б).

Если измерены максимальный и минимальный диаметры катушки D_{max} и D_{min} , то

$$D = 0,5(D_{\text{max}} + D_{\text{min}}); \quad c = 0,5(D_{\text{max}} - D_{\text{min}}).$$

Приведенная формула непригодна для расчета числа витков при заданной индуктивности, так как в этом случае неизвестен средний диаметр D и толщина намотки c . Определить число витков можно,

исходя из приближенной формулы для индуктивности многослойной катушки:

$$L = 0,01 D_{\min} \omega^2.$$

Эта формула дает несколько заниженный результат. Из нее следует

$$\omega = 10 \sqrt{L/D_{\min}}.$$

Число витков по этой формуле получается завышенным, и, следовательно, установить нужное значение индуктивности можно путем сматывания нескольких витков.

По приведенной формуле можно грубо вычислить индуктивность однослойной катушки. Если в эту формулу подставить $L = 1$ мкГн и $D = 1$ см, то получим $\omega = 10$, т. е. индуктивность 1 мкГн есть индуктивность катушки диаметром 1 см, имеющей 10 витков.

Пример. Найти индуктивность многослойной катушки, имеющей размеры: $D_{\min} = 1,4$ см, $D_{\max} = 2,6$ см, $b = 1,1$ см, $\omega = 200$.

Решение. Находим D и c : $D = 0,5 (1,4 + 2,6) = 2$ см; $c = 0,5 (2,6 - 1,4) = 0,6$ см. $L = 0,08 \cdot 2^2 \cdot 200^2 / (3 \cdot 2 + 9 \cdot 1,1 + 10 \cdot 0,6) = 12\,800 / 22 = 580$ мкГн.

По приближенной формуле получим $L = 0,01 \cdot 1,4 \cdot 200^2 = 560$ мкГн.

Пример. Найти число витков многослойной катушки, которая должна иметь $L = 200$ мкГн при $D_{\min} = 2$ см.

Решение: $\omega = 10 \sqrt{200/2} = 100$ витков.

Если катушка находится в экране, то надо учитывать уменьшение индуктивности на 10—20 % под влиянием экрана, и для расчета числа витков выбирать значение L на 10—20 % больше заданного.

43. ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В электротехнике и радиотехнике большое применение получили трансформаторы, которые служат для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформатор имеет две обмотки, находящиеся обычно на общем сердечнике из ферромагнитного материала, например из мягкой стали (рис. 79, а). Одна из обмоток — первичная ω_1 — подключается к генератору того переменного тока, который нужно преобразовать. Ток первичной обмотки создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ . Сердечник трансформатора C делается обычно замкнутым, чтобы магнитный поток шел на всем пути по сердечнику и не рассеивался в воздухе. Переменный магнитный поток индуцирует во вторичной обмотке переменную ЭДС, которая зависит от числа витков этой обмотки и скорости изменения магнитного потока, как это следует из основных законов электромагнитной индукции. Если вторичная обмотка ω_2 имеет больше витков, чем первичная, то вторичное напряжение U_2 выше первичного U_1 и трансформатор назы-

вается *повышающим*. Если же во вторичной обмотке число витков меньше, чем в первичной, то вторичное напряжение ниже первичного и трансформатор называется *понижающим*.

Мощность тока во вторичной обмотке P_2 почти равна мощности первичного тока P_1 , так как потери энергии в трансформаторе незначительны. Мощность является произведением напряжения на ток. Поэтому при повышении напряжения с помощью трансформатора одновременно происходит уменьшение тока и наоборот, а произведение напряжения на ток остается примерно постоянным.

Пусть в первичной обмотке напряжение 200 В и ток 1 А. Тогда первичная мощность составляет 200 Вт. Если трансформатор понижает напряжение в четыре раза, то вторичное

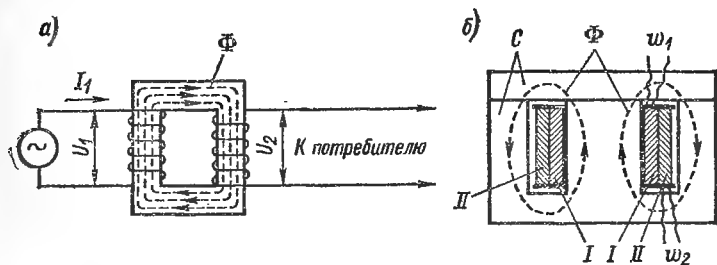


Рис. 79. Устройство трансформатора

напряжение равно 50 В, а ток в четыре раза возрастает и будет равен 4 А. Мощность вторичной цепи по-прежнему составляет $50 \cdot 4 = 200$ Вт.

В действительности у каждого трансформатора вторичная мощность несколько меньше первичной, так как имеются потери энергии на нагрев обмоток и сердечника вследствие его перемангничивания и за счет вихревых токов. Однако у трансформаторов коэффициент полезного действия (КПД), равный отношению вторичной мощности P_2 к первичной P_1 , получается достаточно высоким. У мощных трансформаторов он бывает до 99 % и даже выше, а у трансформаторов малой и средней мощности для радиоаппаратуры КПД может быть около 80—90 %.

Для каждого трансформатора характерна нормальная мощность, которую можно передавать через трансформатор. Второй характерной величиной является нормальное напряжение, на которое рассчитана первичная обмотка. К трансформатору можно подводить напряжение и мощность

меньше нормальных, но увеличение напряжения или мощности сверх нормальных значений недопустимо, так как это вызовет перегрев обмоток и сердечника трансформатора.

Важной величиной является и коэффициент трансформации n , представляющий собой отношение числа витков первичной обмотки w_1 к числу витков вторичной обмотки w_2 , или отношение первичного напряжения ко вторичному:

$$n = w_1/w_2 = U_1/U_2.$$

Например, если $w_1 = 500$ и $w_2 = 1000$, то коэффициент трансформации $n = 1:2$. В данном случае имеем трансформатор, повышающий напряжение в два раза. Для повышающих трансформаторов n всегда меньше единицы. Иногда коэффициентом трансформации называют обратное отношение.

Рассмотрим другой пример. Пусть у трансформатора $w_1 = 600$ и $w_2 = 30$. Этот трансформатор — понижающий, и у него коэффициент трансформации $n = 600:30 = 20:1$, т. е. напряжение снижается в 20 раз. У понижающих трансформаторов n всегда больше единицы.

Нормальная мощность, первичное напряжение и коэффициент трансформации определяют число витков обмоток, площадь сечения сердечника, диаметры проводов обмоток и другие данные трансформатора. Чем больше напряжение в данной обмотке, тем больше в ней должно быть витков.

При этом меняется также и диаметр провода, так как при более высоких напряжениях ток уменьшается, а значит, провод может быть взят более тонкий.

Наибольшее применение получили броневые трансформаторы, имеющие разветвленный магнитный поток (рис. 79, б). У них сердечник со средним, более широким стержнем и двумя боковыми стержнями меньшей ширины напоминает букву Ш, замкнутую дополнительной пластиной. Обмотки размещаются на катушке, которая надевается на средний стержень.

Чаще всего применяется цилиндрическая обмотка. Для нее изготавливается каркас из картона или другого изоляционного материала и на него наматываются обмотки одна поверх другой. Принципиально безразлично, какая обмотка будет внутри и какая снаружи. Иногда обмотки делаются в виде отдельных катушек без каркаса и надеваются непосредственно на сердечник.

Обмотка должна заполнять все внутреннее пространство, окруженное сердечником и называемое окном. Необходимо обеспечить хорошую изоляцию обмоток друг от друга и от

сердечника. Первичную и вторичную обмотки следует располагать возможно ближе друг к другу, чтобы уменьшить вредное явление *магнитного рассеяния*. Оно состоит в том, что часть магнитного потока, созданного первичным током, не пересекает витки вторичной обмотки и, таким образом, не участвует в трансформации. Для уменьшения магнитного рассеяния иногда обмотки делят на части или секции и наматывают секции первичной и вторичной обмотки поочередно. Для снижения потерь энергии сердечник изготовляют из тонких пластинок специальной стали.

В последнее время получили применение *тороидальные* трансформаторы, у которых сердечник имеет форму кольца, изготовленного из стальной ленты. Эти трансформаторы имеют меньший вес, так как для них нужно меньше стали и меньше провода для обмоток. В них также практически отсутствует магнитное рассеяние.

Со стороны вторичной обмотки трансформатор является генератором, обладающим определенной ЭДС и некоторым внутренним сопротивлением. А со стороны первичной обмотки трансформатор представляет собой нагрузку для генератора, питающего трансформатор.

Возможны два основных режима работы трансформатора. Если вторичная обмотка разомкнута, трансформатор работает в режиме холостого хода. Первичная обмотка ведет себя как дроссель и потребляет очень небольшой ток. Мощность этого тока расходуется лишь на весьма незначительные потери — на нагрев сердечника и провода первичной обмотки. Вторичное напряжение в этом режиме наибольшее, равное ЭДС вторичной обмотки. В данном случае трансформатор со стороны первичной цепи обладает большим индуктивным сопротивлением и имеет низкое значение $\cos \varphi$.

При замыкании вторичной обмотки на какой-либо потребитель тока создается режим нагрузки. Чем меньше нагрузочное сопротивление, тем больше вторичный ток и мощность вторичной цепи. Вместе с тем возрастает и первичный ток, так как мощность первичной цепи почти равна мощности вторичной цепи. Напряжение вторичной обмотки нагруженного трансформатора несколько меньше, чем при холостом ходе, потому что имеются потери напряжения на сопротивлении самой вторичной обмотки. Нельзя замыкать на длительное время накоротко вторичную обмотку, так как при этом резко возрастает ток этой обмотки, а также первичный ток, и трансформатор может сгореть.

Нагруженный трансформатор со стороны первичной обмотки обладает главным образом активным сопротивлением. Однако он имеет и некоторое индуктивное сопротивление. Поэтому $\cos \varphi$ у него меньше единицы. Для трансформаторов большой мощности значение $\cos \varphi$ имеет важное значение. Принято характеризовать такие трансформаторы полной мощностью, выраженной в киловольт-амперах (кВ·А или кV·А), и $\cos \varphi$. В трансформаторах малой и средней мощности значение $\cos \varphi$ бывает ниже и не играет такой большой роли. Эти трансформаторы часто характеризуют только значением активной мощности.

Для питания радиоприемников и усилителей от сети переменного тока служат силовые трансформаторы, имеющие

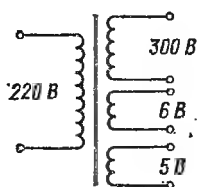


Рис. 80. Изображение на схемах силового трансформатора с несколькими вторичными обмотками

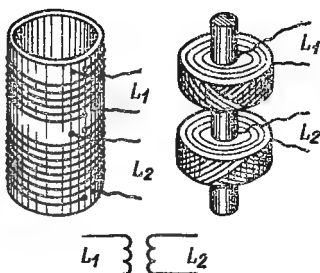


Рис. 81. Трансформаторы высокой частоты и их изображение на схемах

одну первичную обмотку и несколько вторичных обмоток на различные напряжения. Пример схематического изображения одного из таких трансформаторов показан на рис. 80. В цепях токов звуковой частоты радиоприемников и усилителей используются трансформаторы низкой частоты с замкнутым сердечником. Широко применяются трансформаторы высокой частоты, состоящие из двух обмоток, расположенных рядом (рис. 81). Они часто имеют сердечник из магнетодиэлектрика или феррита.

Трансформатор высокой частоты осуществляет *индуктивную связь* двух цепей. Такая связь нередко делается переменной. В этом случае взаимное расположение катушек может изменяться так же, как, например, в вариометре. На схемах переменную связь изображают стрелкой.

В радиоаппаратуре встречаются, кроме того, *автотрансформаторы*, т. е. трансформаторы, в которых первичная

и вторичная обмотки не изолированы друг от друга и частично совмещены. Их применяют иногда для питания приемников и усилителей от сети. У понижающего автотрансформатора вторичная обмотка является частью первичной обмотки (рис. 82, а); такой автотрансформатор можно рас-

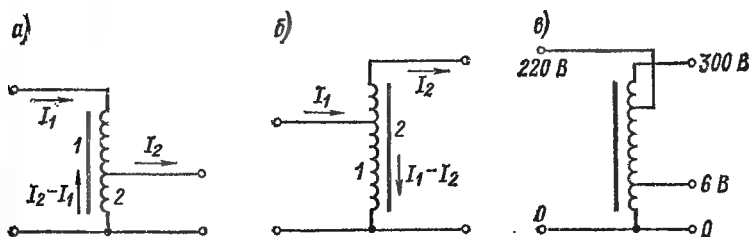


Рис. 82. Автотрансформатор: а — понижающий, б — повышающий, в — универсальный

сматривать как делитель напряжения. В повышающем автотрансформаторе первичная обмотка составляет часть вторичной обмотки (рис. 82, б).

Довольно часто применяются автотрансформаторы, дающие возможность получить несколько различных напряжений. Для примера на рис. 82, в показан автотрансформатор, включенный частью своей обмотки на сетевое напряжение 220 В. От еще меньшей части обмотки можно получить напряжение 6 В, а вся обмотка дает напряжение 300 В.

По сравнению с обычным трансформатором при одной и той же мощности автотрансформатор имеет меньшую площадь сечения сердечника. Это объясняется тем, что в автотрансформаторе не вся энергия передается через магнитный поток. Часть энергии передается за счет непосредственного прохождения тока из первичной цепи во вторичную, так как они соединены друг с другом. Чем ближе коэффициент трансформации автотрансформатора к единице, тем меньше энергии передается магнитным потоком. Если $n = 1$ (рис. 83), то вся энергия переходит из первичной цепи во вторичную без помощи магнитного потока, и в этом случае автотрансформатор становится лишним.

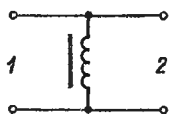


Рис. 83. Автотрансформатор, имеющий $n = 1$

Так как часть витков автотрансформатора входит и в первичную и во вторичную обмотки, то количество провода

для обмоток требуется меньше, чем в трансформаторе. Кроме того, через общую часть обмотки автотрансформатора проходит ток обеих цепей. Для повышающего автотрансформатора он равен $I_1 - I_2$, для понижающего $I_2 - I_1$. Чем ближе друг к другу токи I_1 и I_2 , тем меньше ток в общей части обмотки и тем меньше может быть диаметр ее провода.

В лабораторной практике для регулирования переменного напряжения, получаемого от сети, применяются регулировочные автотрансформаторы, дающие плавное изменение напряжения. Обычно они рассчитаны на напряжение сети 220 и 127 В и дают возможность регулировать напряжение на потребителе от 0 до 250 В. Схема регулировочного

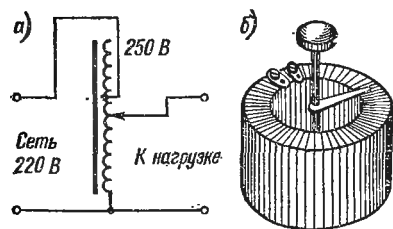


Рис. 84. Схема и принцип устройства лабораторного регулировочного автотрансформатора

автотрансформатора дана на рис. 84, а, а на рис. 84, б показана его конструкция. Сердечник в виде кольца собран из отдельных пластин. Обмотка выполнена изолированным проводом в один слой и имеет очищенную от изоляции «дорожку», по которой можно перемещать подвижный контакт, имеющий контакт с витками через угольную вставку.

Если она замыкает виток накоротко, то вследствие низкого напряжения витка и заметного сопротивления вставки не возникает чрезмерно большой ток, опасный для провода обмотки.

Наличие электрического соединения между вторичной и первичной цепями у автотрансформатора является некоторым его недостатком. Прикосновение к проводам вторичной цепи даже при низком напряжении в ней представляет опасность, так как между этой цепью и землей может быть напряжение, примерно равное первичному, т. е. 220 В. Вследствие того что один из проводов сети обычно заземлен (нулевой провод), при заземлении вторичной цепи возможно короткое замыкание, поэтому при работе с автотрансформатором, включенным в сеть, запрещается заземлять вторичную цепь. При необходимости прикасаться к проводам вторичной цепи работающего автотрансформатора, следует изолировать себя от земли.

Для токов высокой частоты применяются автотрансформаторы без сердечника или с сердечником из магнитодиэлектрика или феррита.

Важным свойством трансформатора (или автотрансформатора) является его способность преобразовывать сопротивление нагрузки.

Рассмотрим это для понижающего трансформатора. Для примера возьмем $n = 4 : 1$, сопротивление нагрузки $R_2 = 20$ Ом и напряжение на первичной обмотке $U_1 = 160$ В. Тогда напряжение вторичной обмотки

$$U_2 = U_1 : n = 160 : 4 = 40 \text{ В},$$

а ток вторичной цепи

$$I_2 = U_2 : R_2 = 40 : 20 = 2 \text{ А}.$$

Мощность вторичной цепи

$$P_2 = U_2 I_2 = 40 \cdot 2 = 80 \text{ Вт}.$$

Так как потери в трансформаторе небольшие, можно для упрощения считать, что мощность первичной цепи также равна $P_1 = 80$ Вт, отсюда

$$I_1 = P_1 : U_1 = 80 : 160 = 0,5 \text{ А}.$$

Теперь подсчитаем сопротивление R_1 первичной обмотки генератора:

$$R_1 = U_1 : I_1 = 160 : 0,5 = 320 \text{ Ом}.$$

Как видно, R_1 получилось в 16 раз больше, чем R_2 . Значит, можно написать:

$$R_1 = n^2 R_2.$$

Мы получили важный результат: *трансформатор, имеющий нагрузку сопротивлением R_2 , всегда имеет для генератора нагрузочное сопротивление R_1 , которое в n^2 раз больше, чем R_2 .*

Иначе говоря, трансформатор преобразует сопротивление нагрузки для генератора в n^2 раз. Если бы генератор был присоединен к R_2 , то он работал бы на нагрузочное сопротивление 20 Ом. Вследствие же того что R_2 включено через трансформатор, имеющий $n = 4$, генератор работает на нагрузочное сопротивление $R_1 = 20 \cdot 4^2 = 320$ Ом.

Таким образом, понижающий трансформатор увеличивает нагрузочное сопротивление для генератора. Если R_2 увеличить, то возрастет и R_1 . При уменьшении R_2 уменьшается и R_1 . Если $R_2 = 0$ (короткое замыкание вторичной цепи), то и $R_1 = 0$, т. е. имеем короткое замыкание генератора (трансформатор забирает очень большой ток от генератора). Все же в этом случае во вторичной цепи остается сопротивление вторичной обмотки, а в первичной цепи — сопротивление первичной обмотки. Они ограничивают возрастание тока при коротком замыкании трансформатора, и поэтому $R_1 \neq 0$. Когда вторичная обмотка разомкнута (холостой ход трансформатора), то R_1 очень большое, и

трансформатор забирает от генератора очень малый ток (ток холостого хода), т. е. первичную цепь можно тоже, грубо говоря, считать разомкнутой.

Повышающий трансформатор также преобразует сопротивление в n^2 раз, но в этом случае получается уменьшение нагрузочного сопротивления.

Преобразование сопротивления с помощью трансформатора имеет широкое применение в радиотехнике. Например, если генератор с большим внутренним сопротивлением должен питать потребитель с малым сопротивлением, то непосредственное включение генератора очень невыгодно. Большая часть ЭДС генератора в этом случае теряется внутри самого генератора и КПД будет весьма низким. Чтобы генератор работал в режиме нормальной нагрузки и КПД был высоким, необходимо между генератором и нагрузочным сопротивлением включить понижающий трансформатор. Тогда сопротивление нагрузки для генератора возрастает и может быть больше его внутреннего сопротивления.

В радиоэлектронной аппаратуре очень часто трансформаторы применяют для согласования сопротивления нагрузки R_n с внутренним сопротивлением генератора R_i , т. е. для получения режима отдачи максимальной мощности. В этом случае коэффициент трансформации n должен обеспечить равенство $n^2 R_n = R_1 = R_i$. Отсюда следует, что для согласования сопротивлений должно быть

$$n = \sqrt{R_i/R_n}.$$

44. ПРОСТЕЙШИЙ РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Иногда приходится самостоятельно изготавливать силовой трансформатор для выпрямителя. В этом случае простейший расчет силовых трансформаторов мощностью до 100—200 Вт проводится следующим образом.

Зная напряжение и наибольший ток, который должна давать вторичная обмотка (U_2 и I_2), находим мощность вторичной цепи:

$$P_2 = U_2 I_2.$$

При наличии нескольких вторичных обмоток мощность подсчитывают путем сложения мощностей отдельных обмоток.

Далее, принимая КПД трансформатора небольшой мощности, равным около 80 %, определяем первичную мощность:

$$P_1 = P_2/0,8 = 1,25 P_2.$$

Мощность передается из первичной обмотки во вторичную через магнитный поток в сердечнике. Поэтому от значения мощности P_1 за-

висит площадь поперечного сечения сердечника S , которая возрастает при увеличении мощности. Для сердечника из нормальной трансформаторной стали можно рассчитать S по формуле:

$$S = \sqrt{P_1}, \text{ або } P_1 = S^2$$

где S — в квадратных сантиметрах, а P_1 — в ваттах.

По значению S определяется число витков w' на один вольт. При использовании трансформаторной стали

$$w' = 50/S.$$

Если приходится делать сердечник из стали худшего качества, например из жести, кровельного железа, стальной или железной проволоки (их надо предварительно стечь, чтобы они стали мягкими), то следует увеличить S и w' на 20—30 %.

Теперь можно рассчитать число витков обмоток

$$w_1 = w'U_1; w_2 = w'U_2 \text{ и т. д.}$$

В режиме нагрузки может быть заметная потеря части напряжения на сопротивлении вторичных обмоток. Поэтому для них рекомендуется число витков брать на 5—10 % больше рассчитанного.

Ток первичной обмотки

$$I_1 = P_1/U_1.$$

Диаметры проводов обмоток определяются по значениям токов и исходя из допустимой плотности тока, которая для трансформаторов принимается в среднем 2 А/мм². При такой плотности тока диаметр провода без изоляции любой обмотки в миллиметрах определяется по табл. 1 или вычисляется по формуле:

$$d = 0,8 \sqrt{I}.$$

Когда нет провода нужного диаметра, то можно взять несколько соединенных параллельно более тонких проводов. Их суммарная площадь сечения должна быть не менее той, которая соответствует рассчитанному одному проводу. Площадь поперечного сечения провода определяется по табл. 1 или рассчитывается по формуле:

$$s \approx 0,8 d^2.$$

Для обмоток низкого напряжения, имеющих небольшое число витков толстого провода и расположенных поверх других обмоток, плотность тока можно увеличить до 2,5 и даже 3 А/мм², так как эти обмотки имеют лучшее охлаждение. Тогда в формуле для диаметра провода постоянный коэффициент вместо 0,8 должен быть соответственно 0,7 или 0,65.

В заключение следует проверить размещение обмоток в окне сердечника. Общая площадь сечения витков каждой обмотки находится умножением числа витков w на площадь сечения провода, равную $0,8 d_{из}^2$, где $d_{из}$ — диаметр провода в изоляции. Его можно определить по табл. 5, в которой также указана масса провода. Площади сечения всех обмоток складываются. Чтобы учесть ориентировочно неплотность намотки, влияние каркаса изоляционных прокладок между обмотками и их слоями, нужно найденную площадь увеличить в 2—3 раза. Площадь окна сердечника не должна быть меньше значения, полученного из расчета.

В качестве примера рассчитаем силовой трансформатор для выпрямителя, питающего некоторое устройство с электронными лампами. Пусть трансформатор должен иметь обмотку высокого напряжения, рассчитанную на напряжение 600 В и ток 50 мА, а также обмотку для накала ламп, имеющую $U = 6,3$ В и $I = 3$ А. Сетевое напряжение 220 В.

Таблица 5

Диаметр провода, мм			Масса 100 м провода, г	
без изоляции	с изоляцией		ПЭЛ-1	ПЭШО
	ПЭЛ-1	ПЭШО		
0,08	0,095	—	4,6	—
0,10	0,115	0,165	7,3	8,9
0,12	0,135	0,185	10,4	12,3
0,15	0,165	0,215	15,2	18,4
0,17	0,185	0,235	20,6	23,0
0,20	0,215	0,280	28,5	31,2
0,25	0,270	0,330	44,5	48,0
0,31	0,340	0,400	68,8	73,3
0,35	0,380	0,440	87,4	92,4
0,41	0,440	0,505	120	126
0,49	0,525	0,585	171	178
0,55	0,590	0,650	215	223
0,59	0,630	0,690	247	256
0,64	0,680	0,740	291	301
0,69	0,730	0,790	342	353
0,74	0,790	0,850	389	401
0,80	0,850	0,910	449	462
0,86	0,910	0,970	524	538
0,93	0,980	1,040	612	627
1,00	1,050	1,120	707	724

Определяем общую мощность вторичных обмоток: $P_2 = 600 \cdot 0,05 + 6,3 \cdot 3 = 30 + 18,9 \approx 49$ Вт. Мощность первичной цепи $P_1 = 1,25 \cdot 49 \approx 60$ Вт.

Находим площадь сечения сердечника из трансформаторной стали:

$$S = \sqrt{60} \approx 7,7 \text{ см}^2.$$

Число витков на один вольт $w' = 50/7,7 = 6,5$.

Ток первичной обмотки $I_1 = 60/220 = 0,27$ А.

Число витков и диаметр проводов обмоток равны: для первичной обмотки $w_1 = 6,5 \cdot 220 = 1430$; $d_1 = 0,8 \sqrt{0,27} = 0,41$ мм; для повышающей обмотки $w_2 = 6,5 \cdot 600 \approx 3900$ (возьмем 4000); $d_2 = 0,8 \sqrt{0,05} = 0,18$ мм; для обмотки накала ламп $w_3 = 6,5 \cdot 6,3 = 41$ (возьмем 45); $d_3 = 0,65 \sqrt{3} \approx 1,1$ мм.

Предположим, что окно сердечника имеет площадь сечения $5 \times 3 = 15 \text{ см}^2$ или 1500 мм^2 , а у выбранных проводов диаметры с изоляцией следующие: $d_{1из} = 0,44$ мм; $d_{2из} = 0,2$ мм; $d_{3из} = 1,2$ мм.

Проверим размещение обмоток в окне сердечника. Находим площади сечения обмоток: для первичной обмотки $0,8 \cdot 0,44^2 \cdot 1430 \approx 250 \text{ мм}^2$.

для повышающей обмотки $0,8 \cdot 0,2^2 \cdot 4000 \approx 128 \text{ мм}^2$; для обмотки накала ламп $0,8 \cdot 1,2^2 \cdot 45 \approx 52 \text{ мм}^2$.

Общая площадь сечения обмоток составляет примерно 430 мм^2 .

Как видно, она в три с лишним раза меньше площади окна и, следовательно, обмотки разместятся.

Расчет автотрансформатора имеет некоторые особенности. Его сердечник надо рассчитывать не на полную вторичную мощность P_2 , а только на ту ее часть, которая передается магнитным потоком и может быть названа трансформируемой мощностью P_T .

Эта мощность определяется по формулам: $P_T = P_2 (1 - n)$ — для повышающего автотрансформатора и $P_T = P_2 (1 - 1/n)$ — для понижающего автотрансформатора, причем $n = U_1 : U_2$.

Если автотрансформатор имеет отводы и будет работать при различных значениях n , то в расчете надо брать значение n , наиболее отличающееся от единицы, так как в этом случае значение P_T будет наибольшее и надо, чтобы сердечник мог передать такую мощность.

Затем определяется расчетная мощность P , которая может быть принята равной $1,15 P_T$. Множитель $1,15$ здесь учитывает КПД автотрансформатора, который обычно несколько выше, чем у трансформатора.

Далее применяются формулы расчета площади сечения сердечника (по мощности P), числа витков на вольт, диаметров проводов, указанные выше для трансформатора. При этом надо иметь в виду, что в части обмотки, являющейся общей для первичной и вторичной цепей, ток равен $I_1 - I_2$, если автотрансформатор повышающий, и $I_2 - I_1$, если он понижающий.

45. КОНДЕНСАТОРЫ

На любом одиночном проводнике можно создать положительный или отрицательный электрический заряд.

При увеличении электрического заряда проводника пропорционально возрастает и его потенциал, т. е. разность потенциалов или напряжение между этим проводником и землей, у которой потенциал принят за нулевой. Потенциал у различных проводников получается различный в зависимости от размеров и формы проводника. Если проводники разных размеров зарядить до одинакового потенциала, то оказывается, что наибольший заряд будет на проводнике, имеющем наибольшие размеры. Принято говорить, что чем больше размеры проводника, тем больше его *электрическая емкость* или *емкость* для электрических зарядов. Подобно этому, при одном и том же давлении в сосуде большего объема можно поместить большее количество газа. Объем сосуда определяет его емкость для газа.

Таким образом, электрический заряд на проводнике и его потенциал прямо пропорциональны друг другу, а также зависят от емкости проводника. Если обозначить емкость буквой C , то можно написать основную формулу, связываю-

щую количество электричества Q на проводнике с его емкостью и потенциалом U :

$$Q = CU.$$

Емкость проводника C является коэффициентом пропорциональности между количеством электричества (электрический заряд) и потенциалом.

Из написанной формулы следует:

$$C = Q/U.$$

Эту формулу надо понимать так, что для каждого проводника отношение заряда на нем к потенциалу есть величина постоянная, представляющая собой емкость данного проводника. Если увеличить заряд в несколько раз, то потенциал возрастет в такое же число раз, а отношение этих величин останется прежним. Приведенная формула отвечает на вопрос: «Что такое емкость?». Если же поставить вопрос: «От чего зависит емкость?», то ответ будет таков: «Емкость зависит от размеров и формы проводника».

В настоящее время основной единицей емкости является *фарад (Ф)*, названный в честь английского ученого М. Фарадея. *Один фарад есть емкость проводника, у которого при заряде в один кулон получается потенциал в один вольт.* Емкость в один фарад очень велика, и на практике применяются более мелкие единицы: миллионная доля фарада — *микрофарад (мкФ)*, миллиардная доля фарада — *нанофарад (нФ)* и миллионная доля микрофарада — *пикофарад (пФ)*. В международной системе фарад, микрофарад, нанофарад и пикофарад соответственно обозначаются F , μF , pF и pF .

Одиночные проводники обладают очень малой емкостью, но существуют приборы, которые при небольших размерах проводников имеют значительную емкость и позволяют накопить большие заряды при сравнительно невысоких напряжениях. Эти приборы называются *конденсаторами* (от слова «конденсация», означающего сгущение). Их назначением является запасание электрических зарядов.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух металлических пластин, отделенных друг от друга слоем изоляции, в качестве которой может служить воздух или какой-либо другой диэлектрик (рис. 85, а). Пластины, называемые обкладками, заряжаются одна положительно, а другая отрицательно. Вследствие сильного взаимного притяжения, разноименные заряды удерживают друг друга. Благодаря этому, возможно накопить в конденсаторе большие электрн-

ческие заряды. На обкладках заряженного конденсатора всегда сосредоточены равные по значению, но разноименные заряды $+Q$ и $-Q$. Применяя для конденсатора формулу $Q = CU$, следует под величиной Q понимать заряд одной обкладки.

Между обкладками заряженного конденсатора создается электрическое поле, которое тем сильнее, чем больше разность потенциалов между обкладками и чем ближе они друг к другу. Силовые линии этого поля идут от положительного заряда одной обкладки к отрицательному заряду другой обкладки (рис. 86). По современным физическим

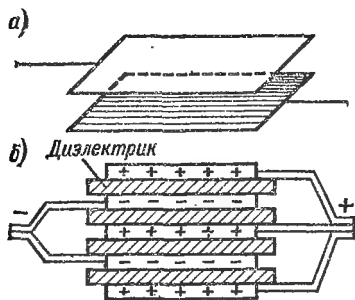


Рис. 85. Устройство плоского конденсатора: а — с двумя пластинами; б — многопластинчатого

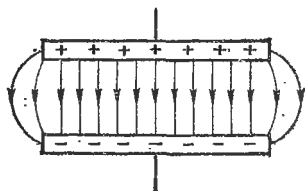


Рис. 86. Электрическое поле в конденсаторе с воздушным диэлектриком

воззрениям энергия заряженного конденсатора запасается в его электрическом поле.

Электрическое поле между обкладками плоского конденсатора является *однородным*. Это означает, что его силовые линии представляют собой прямые, параллельные друг другу и расположенные везде с одинаковой густотой (только у краев пластин поле неоднородное). *Напряженность* однородного электрического поля принято характеризовать разностью потенциалов, приходящейся на единицу длины силовой линии. Если обозначить напряженность поля в конденсаторе через E , а длину силовых линий в нем (расстояние между его обкладками) через d , то

$$E = U/d,$$

где U — напряжение на конденсаторе. Отсюда следует, что напряженность поля надо выражать в вольтах на метр (В/м) или в вольтах на сантиметр (В/см). Важно помнить,

что напряжение и напряженность поля являются различными величинами.

Чем больше площадь обкладок, тем больше емкость конденсатора. Следует учитывать лишь рабочую площадь, т. е. площадь той части обкладки, против которой находится другая обкладка. Кроме того, чем ближе пластины друг к другу, тем сильнее взаимное притяжение зарядов и тем больше емкость. Для примера укажем, что конденсатор из двух пластин площадью 1 см² каждая, с воздушным диэлектриком толщиной 1 мм имеет емкость около 1 пФ.

Емкость конденсатора сильно зависит от вещества диэлектрика между обкладками. Наименьшую емкость имеют

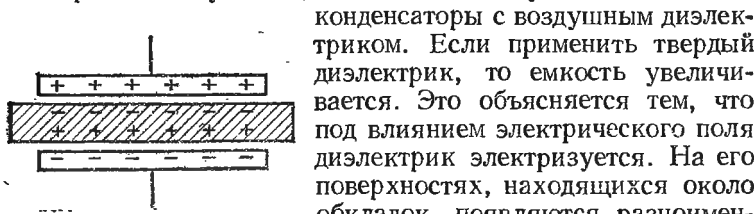


Рис. 87. Распределение зарядов в конденсаторе с твердым диэлектриком

конденсаторы с воздушным диэлектриком. Если применить твердый диэлектрик, то емкость увеличивается. Это объясняется тем, что под влиянием электрического поля диэлектрик электризуется. На его поверхностях, находящихся около обкладок, появляются разноименные заряды (рис. 87), к которым теперь притягиваются заряды на обкладках. Расстояние между этими взаимно притягивающимися зарядами меньше, чем между обкладками. Поэтому заряды сильнее удерживаются на обкладках и емкость возрастает.

Увеличение емкости конденсатора в результате замены воздуха другим диэлектриком характеризуется *относительной диэлектрической проницаемостью* ϵ , называемой просто *диэлектрической проницаемостью*. Для воздуха она равна единице, а для твердых и жидких диэлектриков $\epsilon > 1$. Приведем значения диэлектрической проницаемости ϵ для некоторых веществ:

Слюда	5—7	Конденсаторная кера-	
Резина	2,5—3,0	мика:	
Полистирол	2,5	тиконд	55—160
Конденсаторная бу-		термоконд	15—25
мага	2,2—3,0	тибар	1000—10 000

Следует помнить, что материал обкладок конденсатора не влияет на значение емкости.

Конденсаторы из двух пластин пригодны только для небольшой емкости, так как неудобно чрезмерно увеличивать площадь пластин. Можно, конечно, для увеличения

емкости уменьшать расстояние между пластинами, но только до некоторого предела. Если слой диэлектрика будет очень тонким, то его пробьет искра. Для получения больших емкостей делают многопластинчатые конденсаторы, имеющие две системы пластин (см. рис. 85, б). Все четные пластины соединены между собой и играют роль одной обкладки, а все нечетные пластины также соединены друг с другом и являются второй обкладкой. У каждой из внутренних пластин обе поверхности являются рабочими, а у крайних пластин рабочей является только внутренняя поверхность. Такой конденсатор как бы состоит из нескольких двухпластинчатых конденсаторов, число которых на единицу меньше, чем общее число пластин.

Расчет емкости плоского конденсатора можно сделать по формуле

$$C = 0,88\epsilon S(n - 1)/d,$$

где C — емкость, пФ; ϵ — диэлектрическая проницаемость; S — рабочая площадь одной пластины, см²; n — число пластин, d — толщина диэлектрика, мм.

Чем выше напряжение на конденсаторе, тем толще должен быть диэлектрик. Все конденсаторы после изготовления испытываются напряжением. Рабочее напряжение, при котором конденсатор может работать долгое время без опасности пробоя, обычно в два-три раза меньше испытательного напряжения. Значение рабочего напряжения зависит от электрической прочности диэлектрика. Воздух обладает малой электрической прочностью и сравнительно легко пробивается искрой. Более высокую электрическую прочность имеют твердые диэлектрики, например слюда, керамические материалы и др. Однако не следует думать, что электрическая прочность повышается с увеличением диэлектрической проницаемости.

Диэлектрик конденсатора не может быть идеальным. Электроны отрицательно заряженной обкладки постепенно переходят через диэлектрик на другую обкладку, образуя небольшой ток утечки. Поэтому заряженный конденсатор постепенно уменьшает свой заряд.

На практике иногда соединяют несколько конденсаторов друг с другом.

При параллельном соединении (рис. 88, а) общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Такое соединение применяют в том случае, если имеются конденсаторы меньшей емкости, чем требуемая.

При последовательном соединении нескольких конденсаторов общая емкость, наоборот, уменьшается и будет всегда меньше емкости любого из включенных конденсаторов. Если последовательно соединены два конденсатора одинаковой емкости, то общая емкость равна половине емкости одного из них. Вообще при последовательном соединении одинаковых конденсаторов общая емкость уменьшается во столько раз, сколько взято конденсаторов.

Когда последовательно соединяют два конденсатора разной емкости (рис. 88, б), то общая емкость определяется по формуле:

Когда последовательно соединяют два конденсатора разной емкости (рис. 88, б), то общая емкость определяется по формуле:

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2).$$

Если например, последовательно соединены конденсаторы

емкостью 2000 и 3000 пФ, то общая емкость $C = 2000 \times 3000 / (2000 + 3000) = 1200$ пФ.

Последовательное соединение нередко применяют в случаях, когда имеются конденсаторы большей емкости, чем требуется. Кроме того, при последовательном соединении общее рабочее напряжение может быть больше, чем у одного конденсатора, так как оно равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах.

Формулы для расчета общей емкости при соединении нескольких конденсаторов получаются на основании следующих соображений. При параллельном соединении напряжение на всех конденсаторах одно и то же, а общее количество электричества равно сумме зарядов отдельных конденсаторов.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

Заменив Q произведением CU , получим

$$CU = C_1 U + C_2 U + C_3 U + \dots$$

Сократив на U , получим сумму емкостей.

При последовательном соединении конденсаторов разной емкости (рис. 89) напряжения на них получаются раз-

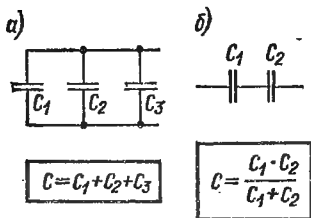


Рис. 88. Параллельное (а) и последовательное (б) соединение конденсаторов

ными и сумма их равна общему напряжению:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Заряды на этих конденсаторах одинаковы. Действительно, пусть цепочка конденсаторов, изображенных на рис. 89, заряжается и на левую обкладку конденсатора C_1 приходит отрицательный заряд $-Q$. Правая обкладка конденсатора C_1 соединена с левой обкладкой конденсатора C_2 . Эти две обкладки изолированы от остальных частей цепи, и вначале они не имели никаких зарядов. Извне к ним заряды прийти не могут. Поэтому заряд $-Q$ на левой обкладке конденсатора C_1 будет отталкивать такой же заряд с правой обкладки этого конденсатора, на которой возникнет заряд $+Q$. Левая обкладка конденсатора C_2 получит заряд $-Q$, который ушел с правой обкладки конденсатора C_1 . Рассуждая точно так же далее, можно прийти к выводу, что на всех последовательно включенных конденсаторах будут заряды $+Q$ и $-Q$. Заменяя напряжения по формуле $U = Q/C$, можно написать

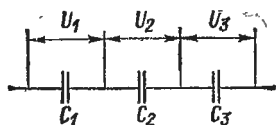


Рис. 89. Последовательное соединение конденсаторов разной емкости

$$Q/C = Q/C_1 + Q/C_2 + Q/C_3 + \dots$$

Сократив на Q , получим формулу для расчета общей емкости

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots$$

Из этого выражения легко вывести приведенную выше формулу для двух конденсаторов.

46. ЗАРЯД И РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

Если конденсатор включен в цепь постоянного тока, то непрерывное прохождение тока невозможно, так как пластины конденсатора разделены диэлектриком. После замыкания цепи пройдет лишь кратковременный ток, заряжающий конденсатор. Когда конденсатор полностью зарядится и напряжение на нем станет равным ЭДС источника, прохождение тока прекратится. Подобно этому, если накачивать насосом газ в закрытый сосуд, то, как только давление газа в сосуде станет равно давлению, создаваемому насосом, дальнейшее поступление газа в сосуд прекратится.

Чем больше емкость конденсатора, тем больше время его заряда, так как он может вместить больше электричества. Все же заряд во многих случаях длится лишь доли секунды. Чем меньше сопротивление резистора, включенного в цепь последовательно с конденсатором, тем быстрее происходит заряд, потому что по цепи проходит больший зарядный ток. Когда это сопротивление весьма мало, то конденсатор заряжается почти мгновенно.

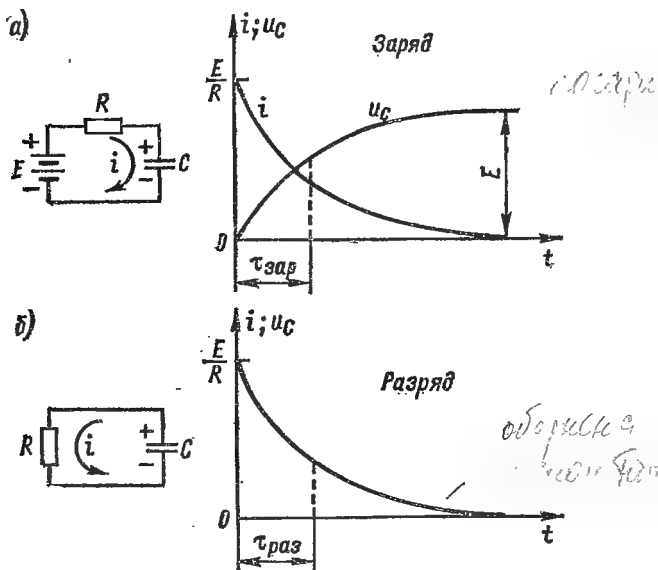


Рис. 90. Графики изменения тока и напряжения при заряде и разряде конденсатора

Если заряженный конденсатор отключить от источника тока и замкнуть на какой-либо резистор, то он разрядится. Чем меньше емкость конденсатора и сопротивление резистора, тем быстрее происходит разряд. При замыкании конденсатора накоротко разряд осуществляется почти моментально. Во время разряда напряжение на конденсаторе и ток в цепи уменьшаются и доходят до нуля. На рис. 90 показаны графики изменения тока и напряжения при заряде и разряде конденсатора. Заряд и разряд конденсатора через резистор встречаются во многих радиотехнических устройствах. Рассмотрим эти процессы более подробно.

Заряженный конденсатор имеет запас энергии и является, по существу, генератором. Но в отличие от обычных генераторов, конденсатор способен давать ток только короткое время. Напряжение на конденсаторе u_c можно условно назвать его электродвижущей силой. При заряде эта ЭДС противодействует ЭДС заряжающего генератора. Действительно, в цепи, изображенной на рис. 90, а, генератор создает зарядный ток, направленный по часовой стрелке, а ЭДС конденсатора действует навстречу и стремится создать ток, направленный против часовой стрелки. Однако этот последний ток не возникает, так как преобладает ЭДС генератора.

В начале заряда, когда конденсатор еще не заряжен, напряжение на нем равно нулю. Поэтому вся ЭДС генератора E приложена к резистору R и ток имеет максимальное значение, равное E/R . Получается, что незаряженный конденсатор как бы замкнут накоротко. Далее конденсатор постепенно заряжается, напряжение на нем растет, все больше противодействуя ЭДС заряжающего генератора. Теперь ток в цепи определяется так

$$i = (E - u_c)/R.$$

По мере возрастания напряжения на конденсаторе u ток становится меньше и заряд происходит все медленнее, так как с уменьшением тока за одни и те же промежутки времени конденсатор получает все меньшее количество электричества. Это наглядно показывают кривые, представленные на рис. 90, а. В конце заряда напряжение очень медленно приближается к значению ЭДС генератора E , а ток — к нулю. Теоретически заряд длится бесконечно, но практически считают, что заряд окончен, когда напряжение u_c станет весьма близко к E .

Для заряда конденсатора характерно, что напряжение достигает максимального значения с опозданием. Ток имеет наибольшее значение в начале заряда, а напряжение нарастает постепенно, т. е. отстает от тока.

Разряд конденсатора происходит по такому же закону, как и уменьшение тока при заряде (рис. 90, б). В начале разряда, когда напряжение на конденсаторе максимальное, равное E , возникает большой ток, равный E/R , и разряд идет быстро. Но по мере снижения напряжения u_c соответственно уменьшается ток и все медленнее и медленнее происходит разряд.

Ток i при заряде или разряде конденсатора зависит от емкости C и скорости изменения напряжения. Это доказывается следующим образом. В течение малого промежутка времени Δt можно считать приближенно ток постоянным, и тогда количество электричества ΔQ , которое получит или отдаст конденсатор за это время, равно $\Delta Q = i \Delta t$. За время Δt напряжение на конденсаторе изменится на Δu_C . Поэтому иначе $\Delta Q = C \Delta u_C$. Отсюда следует, что

$$i \Delta t = C \Delta u_C \text{ или } i = C \Delta u_C / \Delta t.$$

Таким образом, емкость является коэффициентом пропорциональности между током и скоростью изменения напряжения $\Delta u_C / \Delta t$ на конденсаторе. Полученное соотношение имеет внешнее сходство с формулой, определяющей индуктивность как коэффициент пропорциональности между ЭДС самоиндукции и скоростью изменения тока (см. с. 106).

Для характеристики длительности (или скорости) заряда служит *постоянная времени заряда* $\tau_{\text{зар}}$, равная произведению емкости на сопротивление:

$$\tau_{\text{зар}} = CR.$$

Постоянная времени заряда представляет собой время, в течение которого напряжение на конденсаторе возрастает до 63 % значения E . Если C и R выражать в фарадах и омах соответственно, то $\tau_{\text{зар}}$ получается в секундах. На графике рис. 90, а показан промежуток времени, равный $\tau_{\text{зар}}$. Чем больше C и R , тем больше $\tau_{\text{зар}}$ и, следовательно, скорость заряда меньше. Практически считают, что для полного заряда конденсатора необходимо время около $(4 \div 5) \tau_{\text{зар}}$.

Пример 1. Если конденсатор емкостью 2 мкФ заряжается через резистор сопротивлением 3 МОм, то постоянная времени $\tau_{\text{зар}} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^6 = 6$ с. Для полного заряда в этом случае необходимо время примерно $5 \cdot 6 = 30$ с.

Пример 2. Найти постоянную времени заряда, если $C = 100$ пФ и $R = 50$ кОм.

Решение. $\tau_{\text{зар}} = 100 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 5 \text{ мкс.}$

Скорость разряда и его длительность можно характеризовать *постоянной времени разряда* $\tau_{\text{раз}}$, которая определяется так же, как и при заряде:

$$\tau_{\text{раз}} = CR.$$

Она определяет время, в течение которого напряжение на конденсаторе снижается до 37 % первоначального значения E (уменьшается на 63 %). Чем больше C и R , тем

больше $\tau_{\text{раз}}$ и тем медленнее происходит разряд. На графике рис. 90, б показан промежуток времени, равный $\tau_{\text{раз}}$. Обычно считают, что разряд происходит полностью за время около $(4 \div 5)\tau_{\text{раз}}$, хотя теоретически он продолжается бесконечно.

Кривые, изображающие изменения тока и напряжения при заряде и разряде конденсатора, представляют собой так называемые *экспоненты*. Поэтому часто говорят, что заряд и разряд конденсатора происходит по экспоненциальному закону. Такой закон справедлив лишь при заряде конденсатора через обычный резистор от источника постоянной ЭДС и при разряде конденсатора на резистор. В других случаях изменения тока и напряжения происходят по иным законам.

Нередко бывает, что одна обкладка конденсатора соединена с землей (рис. 91). Следует правильно представлять себе, как происходит заряд конденсатора в этом случае. Сначала обе обкладки не имеют зарядов и потенциалы у них равны нулю. Пусть теперь обкладка, изолированная от земли (верхняя обкладка на рис. 91), получает некоторый постоянный отрицательный заряд, т. е. избыток электронов $-Q$. Он будет отталкивать с нижней обкладки равный по значению одноименный заряд, т. е. электроны с этой обкладки уйдут и на ней останется положительный заряд $+Q$. Несмотря на наличие этого заряда, потенциал нижней обкладки останется равным нулю, так как она соединена с землей. Если бы между этой обкладкой и землей была постоянная разность потенциалов, то она вызвала бы постоянный ток в соединительном проводе. Но это противоречит действительности. Кратковременный ток проходит только в процессе заряда, а когда конденсатор заряжен, то никакого тока уже нет.

Рассмотренный случай хорошо подчеркивает разницу между зарядом и потенциалом. Мы видим, что тело может быть заряжено, имея нулевой потенциал. И, наоборот, разные точки электрического поля в вакууме имеют различные электрические потенциалы, но никаких зарядов в них нет.

Если верхняя обкладка конденсатора, включенного по рис. 91, заряжается положительно, то нижняя обкладка зарядится отрицательно; из соединительного провода на

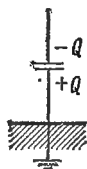


Рис. 91. Заряды на конденсаторе, соединенном с землей

нее придут электроны, притягиваемые положительным зарядом верхней обкладки. Так как нижняя обкладка зарядилась отрицательно, то условно можно сказать, что из нее «ушел в землю положительный заряд».

47. КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Постоянный ток через конденсатор не проходит. Если же конденсатор включить в цепь переменного тока (рис. 92, а), то в цепи будет существовать ток. Принято говорить, что *переменный ток проходит через конденсатор*. Конечно, это не следует понимать в том смысле, что электроны движутся через диэлектрик конденсатора. На самом деле совершается следующий процесс.

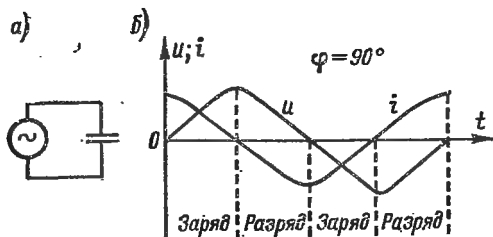


Рис. 92. Конденсатор в цепи переменного тока: а — схема включения, б — графики тока и напряжения

Когда напряжение на зажимах генератора возрастает, конденсатор заряжается (в цепи протекает зарядный ток). Энергия переходит из генератора в конденсатор и запасается в его электрическом поле. Напряжение на конденсаторе увеличивается, достигая в какой-то момент амплитудного значения. В этот момент конденсатор полностью заряжен, и зарядный ток прекращается. Затем напряжение генератора начинает уменьшаться. А так как конденсатор был заряжен до амплитудного напряжения, то теперь он будет разряжаться на генератор, отдавая последнему запасенную энергию. Направление тока при разряде конденсатора противоположно направлению зарядного тока. Когда напряжение снизится до нуля, конденсатор полностью разрядится.

Таким образом, в первую четверть периода конденсатор является потребителем (нагрузкой), а во вторую четверть

периода он, наоборот, служит генератором, а роль потребителя выполняет генератор. В третью четверть периода повторится заряд, так как напряжение генератора снова возрастает, а в четвертую четверть периода опять произойдет разряд. В цепи будет проходить переменный ток, являющийся током заряда и разряда конденсатора. При этом конденсатор представляет собой для переменного тока некое *емкостное сопротивление*, являющееся чисто реактивным. Действительно, генератор отдает энергию конденсатору только при заряде, а при разряде конденсатор возвращает эту энергию, т. е. в конденсаторе нет безвозвратного расхода энергии.

Весь описанный процесс изменения напряжения и тока показан на рис. 92, б. Конденсатор, являясь реактивным сопротивлением, подобно катушке индуктивности, вызывает сдвиг фаз между током и напряжением на четверть периода, т. е. на 90° . Однако в катушке индуктивности ток отстает по фазе от напряжения, а в конденсаторе напряжение отстает по фазе от тока. Иначе говоря, в конденсаторе ток опережает по фазе напряжение на 90° . Если же вместе с конденсатором имеется еще участок с активным сопротивлением, то сдвиг фаз между напряжением всей цепи и током будет меньше 90° .

На рис. 93 показана векторная диаграмма для конденсатора. Как видно, вектор тока опережает вектор напряжения на 90° (напомним, что векторы надо считать вращающимися против часовой стрелки).

Ток в цепи с конденсатором зависит от напряжения генератора, емкости конденсатора и частоты. Зависимость тока от напряжения является обычной, вытекающей из закона Ома: чем больше напряжение генератора, тем больше ток. Если же увеличить емкость конденсатора, то зарядный и разрядный токи увеличатся, так как при большей емкости конденсатор будет запасать больший заряд. Но *увеличение тока равноценно уменьшению сопротивления*. Таким образом, при увеличении емкости емкостное сопротивление уменьшается.

При более высокой частоте заряд и разряд происходят быстрее, т. е. определенное количество электричества проходит в более короткие промежутки времени, и поэтому ток увеличивается, что равносильно уменьшению сопро-

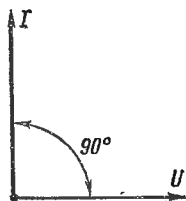


Рис. 93. Векторная диаграмма конденсатора

тивления. Таким образом, с повышением частоты емкостное сопротивление уменьшается. Вспомним, что индуктивное сопротивление с повышением частоты возрастает. Следовательно, влияние частоты на емкостное и индуктивное сопротивления противоположно.

Емкостное сопротивление обозначают x_C ; его значение в омах можно вычислить по формуле:

$$x_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC) = 1/(6,28fC),$$

где f — частота, Гц; C — емкость, Ф.

В этой формуле удобно считать $2\pi \approx 6,25$, а не 6,28. Такое приближение дает ошибку всего лишь 0,5 %.

Подсчитаем для примера сопротивление конденсатора емкостью 1 мкФ для тока частотой 50 Гц: $x_C = 1/(2\pi 50 \cdot 10^{-6}) \approx \approx 10^6 / (6,25 \cdot 50) = 3200$ Ом.

Тот же конденсатор для тока частотой 5 МГц представляет сопротивление в 100 000 раз меньше, так как частота увеличилась в 100 000 раз. Емкостное сопротивление в этом случае равно 0,032 Ом. Если же взять конденсатор емкостью 100 пФ или 0,0001 мкФ, то его сопротивление будет в 10 000 раз больше. Для тока частотой 50 Гц оно составит 32 МОм, т. е. практически этот конденсатор не пропускает ток низкой частоты, а для тока с частотой 5 МГц его сопротивление равно всего лишь 320 Ом. Емкостные сопротивления различных конденсаторов при разных частотах указаны в табл. 6.

Таблица 6

Частота, кГц	Сопротивление конденсатора, Ом, емкостью					
	10 пФ	100 пФ	1000 пФ	10 000 пФ	0,1 мкФ	1 мкФ
0,05	$320 \cdot 10^6$	$32 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$	320000	32000	3200
1	$16 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^5$	16000	1600	160
200	$80 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	800	80	8	0,8
1000	$16 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	160	16	1,6	0,16
10000	$1,6 \cdot 10^3$	160	16	1,6	0,16	0,016

Физический смысл емкостного сопротивления состоит в том, что заряженный конденсатор создает напряжение, которое противодействует ЭДС заряжающего генератора. В этом отношении конденсатор подобен катушке. Но разница между ними состоит в том, что ЭДС самоиндукции катушки действует навстречу току при его возрастании, а напряже-

ние конденсатора противодействует току во время заряда, когда ток уменьшается.

Простейший вывод формулы емкостного сопротивления можно сделать с помощью приведенного в предыдущем параграфе выражения

$$i = C \Delta u_C / \Delta t.$$

Чтобы получить более точную формулу для x_C , следует взять возможно меньший промежуток времени Δt . На рис. 94 показаны графики u_C и i для одной четверти периода. Из графика видно, что для небольшого промежутка времени, со-

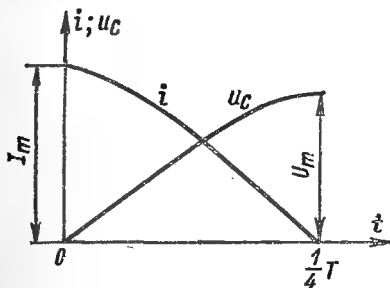


Рис. 94. Графики тока и напряжения для емкостного сопротивления

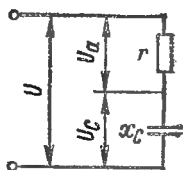


Рис. 95. Последовательная цепь с активным и емкостным сопротивлением

ставляющего десятую часть четверти периода, т. е. $T/40$ и соответствующего фазовому углу $360 : 40 = 9^\circ$, ток почти постоянен и равен приближенно I_m , а напряжение изменяется от 0 до значения $U_m \sin 9^\circ$. Так как $\sin 9^\circ = 0,1564$, то $\Delta u_C = 0,1564 U_m$. Следовательно,

$$I_m = C \frac{0,1564 U_m}{T/40} = 6,25 C U_m / T = 6,25 f C U_m$$

и тогда

$$U_m / I_m = x_C = 1 / (6,25 f C).$$

Более точно методами высшей математики можно доказать, что постоянный коэффициент в этой формуле равен $2\pi = 6,28$.

Все расчеты электрических цепей с активным и емкостным сопротивлением делают подобно расчетам цепей с активным

и индуктивным сопротивлением. В соответствующих формулах только следует вместо индуктивного сопротивления x_L поставить емкостное сопротивление x_C . Приводим эти формулы без подробных пояснений.

Для последовательной цепи (рис. 95) полное сопротивление z и полное напряжение U определяются по формулам

$$z = \sqrt{r^2 + x_C^2} \text{ и } U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2}.$$

Проще всего эти формулы получить из рассмотрения векторной диаграммы, показанной на рис. 96. Вектор напряжения U_a на активном участке цепи совпадает по фазе с вектором тока I , а вектор напряжения U_C на конденсаторе

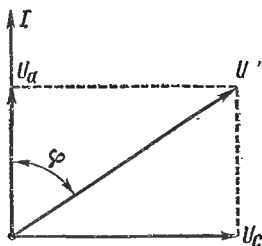


Рис. 96. Векторная диаграмма для последовательной цепи с конденсатором

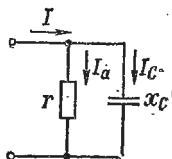


Рис. 97. Параллельная цепь с активным и емкостным сопротивлением

отстает от вектора тока на 90° . Вектор полного напряжения U получается в виде геометрической суммы векторов U_a и U_C . Напряжение U отстает от тока на угол $\varphi < 90^\circ$. Если разделить значения напряжений, соответствующих этим векторам, на ток, то получится треугольник сопротивлений, из которого следует приведенная выше формула для полного сопротивления.

Если одно из сопротивлений x_C или r в десять или большее число раз меньше другого, то этим меньшим сопротивлением можно пренебречь и считать, что z равно только одному большему сопротивлению. Ошибка при таком определении z не превышает 0,5%.

Для параллельной цепи (рис. 97) проводимость определяется формулой

$$y = \sqrt{g^2 + b^2},$$

где $g = 1/r$ — активная проводимость; $b_c = 1/x_c$ — емкостная (реактивная) проводимость. Полное сопротивление и полный ток соответственно равны

$$z = 1/y = r x_c / \sqrt{r^2 + x_c^2}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_c^2}.$$

Векторная диаграмма для параллельной цепи показана на рис. 98. На ней вектор тока I_a в активной ветви совпадает по направлению (т. е. по фазе) с вектором напряжения U , а вектор тока I_c в емкостной ветви опережает напряжение на 90° . Полный ток показан вектором I , полученным геометрическим сложением векторов I_a и I_c . Видно, что сдвиг фаз φ между током I и напряжением U меньше 90° . Из этой диаграммы непосредственно вытекает приведенная выше формула, связывающая токи для параллельной цепи, а если токи поделить на напряжение U , то получится формула, связывающая между собой проводимости.

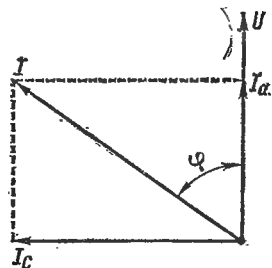


Рис. 98. Векторная диаграмма параллельной цепи с конденсатором

При любой цепи справедливы следующие формулы: закон Ома

$$I = U/z \text{ или } I = yU;$$

полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ или } S = UI;$$

активная мощность

$$P = I_a^2 r \text{ или } P = S \cos \varphi;$$

реактивная мощность

$$Q = I_c^2 x_c \text{ или } Q = S \sin \varphi.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P/S.$$

Иначе можно находить $\cos \varphi$: при последовательном соединении $\cos \varphi = r/z$, при параллельном соединении $\cos \varphi = g/y = z/r$.

Если цепь имеет только одни емкостные сопротивления, то необходимо просто складывать арифметически напряже-

ния и сопротивления для последовательного соединения или токи и проводимости для параллельного. Реактивные мощности отдельных конденсаторов в этом случае также складываются арифметически.

48. КОНДЕНСАТОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Наряду с катушками индуктивности широкое применение в радиоэлектронике получили конденсаторы.

Основными величинами, характеризующими конденсаторы, являются: *номинальное значение емкости, стабильность и точность емкости, рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$, испытательное напряжение $U_{\text{исп}}$, потери энергии и сопротивление изоляции.*

Емкость указывается в пикофарадах или микрофарадах. Большое значение имеют точность емкости и ее стабильность, которые зависят от конструкции конденсатора. Емкость конденсатора может изменяться по многим причинам. Особенно сильно влияет на емкость нагрев, который изменяет геометрические размеры конденсатора и диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

У большинства конденсаторов при повышении температуры емкость увеличивается. Конденсаторы, имеющие невысокую точность и стабильность емкости, применяются только там, где изменение емкости в значительных пределах не влияет на работу схемы.

На конденсаторах иногда указывается точность емкости, например $C = 500 \text{ пФ} \pm 10 \%$. Это означает, что отклонение от номинальной емкости может быть не более 10 %, т. е. не более 50 пФ в любую сторону.

В последние годы на конденсаторах, особенно малогабаритных, емкость и допуск емкости указываются по сокращенной кодированной системе. По этой системе пикофарады, нанофарады и микрофарады обозначаются соответственно буквами П, Н и М, причем буква одновременно выполняет роль запятой, а числовое значение построено так, чтобы было не более двух цифр. В конце ставится буква, обозначающая допуск: И для $\pm 5 \%$, С для $\pm 10 \%$ и В для $\pm 20 \%$. Так, например, 15 ПС означает $15 \text{ пФ} \pm 10 \%$, Н 15 В расшифровывается как $0,15 \text{ нФ} \pm 20 \%$, а 1 М5С означает $1,5 \text{ мкФ} \pm 10 \%$.

Рабочее напряжение — это максимальное допустимое напряжение, при котором конденсатор может работать продолжительное время. Значение $U_{\text{раб}}$ должно быть не

меньше амплитудного значения приложенного переменного напряжения, а при пульсирующем напряжении — не меньше максимального напряжения, равного сумме постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей. После изготовления конденсаторов на заводе их проверяют испытательным напряжением, которое значительно выше рабочего.

Сопротивление изоляции конденсатора характеризует утечку тока через диэлектрик из-за несовершенства диэлектрика и имеет в большинстве случаев значение порядка сотен или тысяч мегаом и более.

Качество конденсаторов характеризуется также значением потерь энергии в них при переменном токе. В хороших конденсаторах эти потери ничтожны; они значительно меньше, чем в катушках.

Конденсаторы малой емкости (от десятков до тысяч пикофарад) чаще всего служат для пропускания токов высокой частоты. Для пропускания токов низкой частоты применяются конденсаторы большей емкости (порядка сотых и десятых долей микрофарада и целых микрофарад).

Во многих случаях конденсаторы используются для разделения друг от друга постоянного и переменного токов, а также токов высокой и низкой частоты. Например, конденсатор небольшой емкости не пропускает постоянного тока и практически не пропускает тока низкой частоты, потому что для этого тока сопротивление конденсатора очень велико. Но ток высокой частоты свободно проходит через такой конденсатор.

Различают конденсаторы *постоянной и переменной емкости*, а в зависимости от рода диэлектрика конденсаторы бывают *воздушные, керамические, стеклянные, слюдяные, бумажные и металlobумажные, пленочные и металлопленочные, оксидные (электролитические) и другие*.

Рассмотрим прежде всего конденсаторы постоянной емкости. Некоторые их типы изображены на рис. 99.

Воздушные конденсаторы имеют большую массу и объем, так как делаются из пластин листового металла (алюминия). Емкость у них обычно не более сотен пикофарад. Но зато потери энергии в них наименьшие. Эти конденсаторы применяются редко, в основном только в радиопередатчиках.

Керамические конденсаторы названы так потому, что диэлектриком в них служит специальная керамика, в которой потери энергии на высоких частотах малы. Обкладки керамических конденсаторов в виде тонкого слоя металла

наносятся на поверхность керамики и покрываются цветной эмалью. Эти конденсаторы изготавливаются на емкости от единиц до сотен тысяч пикофард и более и на рабочее напряжение в сотни вольт. Они имеют довольно хорошую стабильность емкости и большое сопротивление изоляции. Выпускаются конденсаторы различной формы: дисковые, трубчатые и др.

Большой интерес представляют собой керамические конденсаторы, у которых в отличие от обычных конденса-

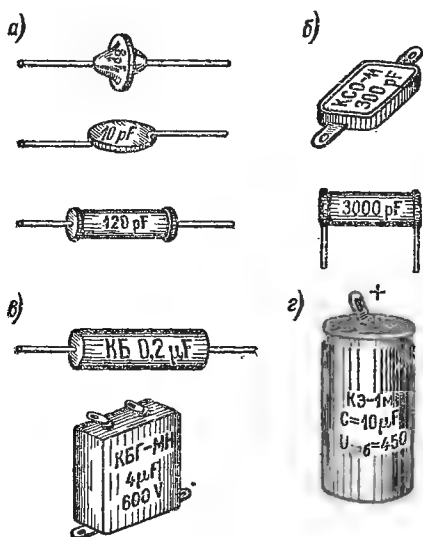


Рис. 99. Некоторые типы конденсаторов постоянной емкости: а — керамические; б — слюдяные; в — бумажные; з — электролитический

торов при нагревании емкость не увеличивается, а уменьшается. С их помощью можно скомпенсировать увеличение емкости других конденсаторов и таким образом обеспечить высокую стабильность емкости. Подобные конденсаторы называются *термокомпенсирующими*. Имеются также керамические конденсаторы, почти не изменяющие емкости при изменении температуры. Их называют *термостабильными*. Особую группу составляют конденсаторы из так называемой *сегнетокерамики*. Они имеют большую емкость, чем другие типы (при одинаковых размерах), и сильно

изменяют емкость при изменении температуры, а также при изменении напряжения, т. е. являются *нелинейными конденсаторами*. Потери в сегнетокерамических конденсаторах значительны, и поэтому в цепях высокой частоты их можно применять только в качестве короткозамыкающих.

Стеклянные и стеклокерамические конденсаторы изготавлиются на емкости от десятков до тысяч пикофарад и рабочие напряжения до сотен вольт. Они имеют прямоугольную форму и представляют собой спеченные при высокой температуре слои стекла или стеклокерамики и серебра. Потери в этих конденсаторах малы, и поэтому они по качествам не уступают керамическим.

Слюдяные конденсаторы, широко применявшиеся на высоких частотах раньше, в значительной степени уступили место керамическим конденсаторам, имеющим лучшие показатели. Емкость слюдяных конденсаторов — от десятков до десятков тысяч пикофарад, а рабочие напряжения составляют сотни вольт. Обкладки делают из фольги или наносятся на поверхность слюды в виде слоя серебра. Для уменьшения внешних влияний слюдяные конденсаторы запрессовываются в пластмассу. Они могут иметь допуск по емкости ± 2 , ± 5 , ± 10 и ± 20 %.

Бумажные конденсаторы представляют собой свернутые в рулон чередующиеся ленты из фольги и из бумаги, пропитанной изоляционным составом. Рулон помещается в корпус из картона, металла или керамики. Эти конденсаторы выпускаются разных типов на емкости от тысяч пикофарад до нескольких микрофарад и на рабочие напряжения до сотен вольт. Так как потери в бумаге сравнительно велики, то бумажные конденсаторы по качествам хуже слюдяных. Их применяют лишь в цепях низкой частоты или для короткого замыкания токов высокой частоты. Некоторые типы бумажных конденсаторов обладают заметной индуктивностью и для токов высокой частоты их сопротивление получается значительным. Поэтому выпускаются *безындукционные* конденсаторы, в которых ленты из фольги сдвинуты одна относительно другой и после сворачивания в рулон их края, находящиеся на разных сторонах конденсатора, обжимаются и соединяются с выводными проводниками. Вывод от наружной обкладки такого конденсатора обычно бывает указан и его следует соединять с шасси (землей). Допуски по емкости у бумажных конденсаторов бывают ± 5 , ± 10 , ± 20 %.

Металлобумажные конденсаторы по своим электрическим качествам и устройству весьма сходны с бумажными конденсаторами. Но в них нет лент из фольги, а на бумажные ленты с одной их стороны нанесен тонкий слой легкоплавкого металла. Эти конденсаторы имеют емкости от тысяч пикофарад до единиц микрофарад и рабочие напряжения до сотен вольт. По сравнению с бумажными конденсаторами они имеют гораздо меньшие размеры и обладают свойством самовосстановления при пробое диэлектрика, что объясняется расплавлением металлического слоя вокруг места пробоя. В результате такого расплавления место пробоя оказывается разъединенным от обкладок.

Пленочные и металлопленочные конденсаторы обладают высокими качествами и не уступают керамическим конденсаторам. Диэлектриком в них является пленка из полистирола, лавсана или фторопласта. Обкладками служат: в пленочных конденсаторах — ленты из фольги, в металлопленочных — металлические слои, нанесенные на диэлектрик. Емкость этих конденсаторов бывает от сотен пикофарад до десятков микрофарад, а рабочие напряжения — от десятков до тысяч вольт. Допуск по емкости может быть от ± 1 до ± 20 %.

Большие емкости (до 10 000 мкФ) имеют *оксидные* конденсаторы. Чаще всего применяются алюминиевые оксидные конденсаторы. Принцип их действия состоит в том, что на поверхности алюминиевой фольги, являющейся положительным электродом и находящейся в специальном электролите, при прохождении тока образуется слой окиси алюминия, который является изолятором. В результате получается конденсатор, у которого обкладками являются алюминиевая фольга и электролит, а диэлектриком — слой окиси алюминия. Благодаря ничтожно малой толщине этого слоя, удается получить очень большие емкости. При пробое обычно слой окиси сам восстанавливается после того, как напряжение будет снято. Оксидные конденсаторы имеют малые размеры, небольшую массу и невысокую стоимость. Их недостатки — сравнительно малое рабочее напряжение (не выше 500 В) и значительный ток утечки. Эти конденсаторы можно применить лишь в тех цепях, в которых имеется постоянное напряжение, причем включать их нужно с соблюдением полярности, которая указана на корпусе. Алюминиевый корпус конденсатора является отрицательным полюсом.

В последние годы выпущены оксидные конденсаторы, не имеющие полярности. Они могут работать при отсутствии постоянного напряжения. Выпускаются также танталовые оксидные конденсаторы с положительным электродом в виде цилиндра пористой структуры из тантала, находящегося в жидком электролите. Диэлектриком является тонкий слой окиси тантала.

При включении оксидных конденсаторов в цепь после длительного их бездействия вначале наблюдается резко увеличенный ток утечки. Однако он довольно быстро уменьшается до нормального значения. Ток утечки возрастает при повышении температуры. Кроме того, после нескольких тысяч часов работы емкость оксидных конденсаторов заметно уменьшается. Значительное снижение емкости получается также при низких температурах.

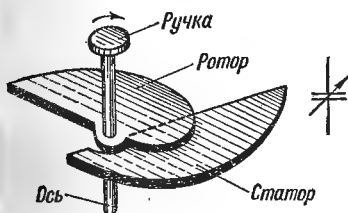


Рис. 100. Принцип устройства конденсатора переменной емкости и его изображение на схемах



Рис. 101. Керамический подстроечный (полупеременный) конденсатор и его изображение на схемах

Помимо конденсаторов постоянной емкости, для настройки радиоприемников и других радиоприборов большое применение нашли конденсаторы переменной емкости. Обычно это воздушные конденсаторы, реже с твердым диэлектриком. На рис. 100 показан принцип устройства и схематическое изображение таких конденсаторов. Конденсатор переменной емкости имеет систему неподвижных пластин, называемую *статором*, и систему подвижных пластин, укрепленных на оси, и называемую *ротором*. При повороте оси конденсатора подвижные пластины входят в большей или меньшей степени в промежутки между неподвижными пластинами, и емкость увеличивается. Для упрощения чертежа на рис. 100 изображена только одна неподвижная и одна подвижная пластины в положении, соответствующем некоторой небольшой емкости. Емкость таких конденсаторов обычно может изменяться примерно

от единиц до нескольких сотен пикофарад, например от 10 до 400 пФ.

Применяются также маленькие конденсаторы переменной емкости, называемые *подстроечными* или *полупеременными* и состоящие чаще всего из двух пластин. У них емкость изменяется в небольших пределах, например, от 4 до 15 пФ. Эти конденсаторы обычно делаются керамическими и обозначаются на схемах так, как показано на рис. 101.

49. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ, ИНДУКТИВНЫМ И ЕМКОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В общем случае в цепи переменного тока могут быть участки с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением. На рис. 102 показано их последовательное соединение. Расчет такой цепи производится на основании следующих соображений.

Индуктивное сопротивление вызывает отставание по фазе тока от напряжения, а емкостное сопротивление дает обратный эффект: ток в нем опережает по фазе напряжение. Для того чтобы учесть эти противоположные действия индуктивного и емкостного сопротивлений, их складывают с разными знаками. Поэтому общее реактивное сопротивление при последовательном соединении равно:

$$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C.$$

Реактивное сопротивление следует, как обычно, складывать геометрически с активным сопротивлением:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Подобные же формулы могут быть написаны и для напряжений:

$$U_p = U_L - U_C;$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Векторная диаграмма для последовательной цепи, содержащей r , L и C , показана на рис. 103. На ней вектор напряжения U_a совпадает по направлению с вектором тока I . Напряжение на конденсаторе U_C отстает на 90° от тока, а напряжение на катушке U_L опережает ток на 90° . Диаграмма построена для случая, когда $x_C > x_L$ и, сле-

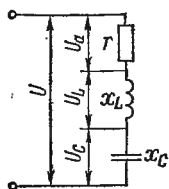


Рис. 102. Последовательная цепь с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением

довательно, $U_C > U_L$. Результирующее реактивное напряжение U_p выражено вектором, равным разности $U_C - U_L$. Сложение этого вектора с вектором активного напряжения U_a дает полное напряжение U , которое отстает от тока на угол $\varphi < 90^\circ$. Это говорит о том, что цепь имеет емкостный характер.

В последовательной цепи большее влияние всегда оказывает то сопротивление, которое больше. Если $x_L > x_C$, то преобладает индуктивное сопротивление, и вся цепь представляет собой для генератора нагрузку индуктивного характера, имеющую активное сопротивление r и индуктивное сопротивление, равное $x_L - x_C$.

В этом случае ток отстает по фазе от напряжения U . А если $x_L < x_C$, то преобладает емкостное сопротивление и вся цепь эквивалентна последовательному соединению активного участка с сопротивлением r и емкостного с сопротивлением, равным $x_C - x_L$. Для этого случая ток опережает по фазе напряжение U .

Интересным является случай, когда $x_L = x_C$. Тогда действия индуктивного и емкостного сопротивления взаимно компенсируются и для генератора эти сопротивления как бы не существуют. Общее реактивное сопротивление равно нулю:

$$x = x_L - x_C = 0,$$

а полное сопротивление цепи становится минимальным и чисто активным: $z = r$. Это означает, что ток в цепи наибольший и сдвиг фаз между током I и напряжением U отсутствует.

Такой случай носит название *последовательного резонанса* или *резонанса напряжений* и имеет широкое применение в радиотехнике.

При параллельном соединении (рис. 104, а) получаются аналогичные соотношения, но только сопротивления надо заменить проводимостями, а напряжения — токами. Общая реактивная проводимость цепи для этого случая

$$b = b_L - b_C, \text{ где } b_L = 1/x_L \text{ и } b_C = 1/x_C.$$

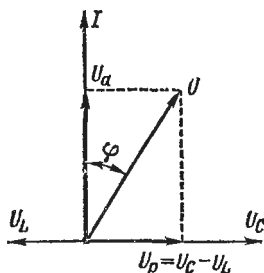


Рис. 103. Векторная диаграмма для последовательной цепи с r , L и C

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \text{ а } z = 1/y.$$

Для токов можно написать

$$I_p = I_L - I_C; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}.$$

На рис. 104, б построена векторная диаграмма для параллельной цепи. Вектор тока I_a в активной ветви совпадает по фазе с вектором напряжения U . Ток I_L отстает от напряжения на 90° , а ток I_C опережает напряжение на 90° . Диаграмма построена для случая, когда $x_C < x_L$ и, соответственно этому, $I_C > I_L$. Результирующий реактивный ток выражается вектором $I_C - I_L$. Сложив этот вектор с вектором тока I_a , получим вектор полного тока I ,

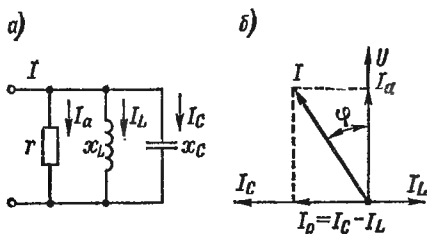


Рис. 104. Параллельная цепь с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением (а) и ее векторная диаграмма (б)

который опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Это означает, что вся цепь представляет собой нагрузку емкостного характера.

При параллельном соединении большее влияние всегда оказывает то сопротивление, которое меньше. Если $x_L > x_C$, то $b_L < b_C$. Преобладает емкостная проводимость, и вся цепь ведет себя как активная нагрузка с параллельно подключенной емкостью. В этом случае ток I опережает по фазе напряжение U . Но если $x_L < x_C$, то $b_L > b_C$ и полное сопротивление имеет индуктивный характер. Ток в цепи отстает по фазе от напряжения.

В случае параллельного соединения действия индуктивного и емкостного сопротивления также могут взаимно скомпенсироваться. Это будет при $x_L = x_C$, т. е. при $b_L = b_C$. Тогда

$$b = b_L - b_C = 0$$

и полная проводимость цепи равна $y = g = 1/r$, а полное сопротивление цепи $z = r$. Оно имеет наибольшее значение и является чисто активным. Ток генератора I становится наименьшим, а сдвиг фаз между этим током и напряжением U отсутствует.

Этот случай носит название *параллельного резонанса*, или *резонанса токов*. Он также имеет большое применение в радиотехнике.

При любом резонансе генератор работает на чисто активную нагрузку. Поэтому он развивает только активную мощность, т. е. работает при $\cos \varphi = 1$, что весьма благоприятно. Реактивная мощность в цепи существует, но она характеризует лишь колебание энергии между катушкой и конденсатором. Энергия запасается то в магнитном поле катушки, то в электрическом поле конденсатора. Между генератором и внешней частью цепи колебаний энергии нет.

Возможность повышения $\cos \varphi$ до единицы при резонансе широко используется в электрификации. Если имеются какие-либо потребители с индуктивным характером сопротивления (электродвигатель, трансформатор), понижающие $\cos \varphi$, то параллельно им включают конденсаторы. Тогда емкостный ток этих конденсаторов, опережающий по фазе напряжение, компенсирует полностью или хотя бы частично индуктивный ток, отстающий по фазе от напряжения, и $\cos \varphi$ повышается.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВЫПРЯМИТЕЛИ

50. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для питания различной радиоэлектронной аппаратуры от электрической сети переменного тока наиболее широкое распространение получили полупроводниковые выпрямители. Они имеют важные достоинства: малые размеры и масса, большой срок службы (до десятков тысяч часов), большая механическая прочность (стойкость к тряске, ударам, вибрациям), высокий КПД, так как потери энергии в них незначительны. Полупроводниковые выпрямители обладают и некоторыми недостатками. У отдельных полупроводниковых приборов данного типа наблюдается значительный разброс параметров и характеристик. Свойства этих приборов сильно зависят от температуры. Однако в выпрямителях эти недостатки обычно не имеют существенного значения.

Применявшиеся ранее купроксные (меднозакисные) и селеновые выпрямители теперь уже почти не встречаются. Их заменили выпрямители с германиевыми или кремниевыми диодами.

В переносной радиоэлектронной аппаратуре в качестве источников питания используются сухие элементы, батареи и аккумуляторы, но они представляют собой готовые изделия и не нуждаются в особом рассмотрении, а выпрямители на нужное напряжение часто приходится делать самостоятельно из деталей и поэтому они подробно описываются в данной главе.

Следует обратить внимание на важнейшие особенности выпрямительных устройств. В зависимости от назначения они могут быть сделаны на различные постоянные напряжения (от единиц вольт для питания транзисторной аппаратуры до тысяч вольт для питания аппаратуры с электронно-лучевыми трубками). Самые маломощные выпрямители дают токи около единиц миллиампер, а у мощных выпрямителей токи достигают десятков ампер и более. Иногда бывает предусмотрена регулировка получаемого постоянного напряжения. Желательно, чтобы выпрямитель имел возможно более высокий КПД; иначе говоря, потери энергии в самом выпрямителе должны быть как можно меньше.

В результате выпрямления всегда получаются пульсации напряжения, и поэтому важной частью выпрямительного устройства является сглаживающий фильтр для уменьшения пульсаций. В тех случаях, когда требуется получить стабильное напряжение, в состав выпрямителя входит специальный стабилизатор.

Как правило, переменное напряжение от электрической сети подается на выпрямитель через трансформатор и значительно реже через автотрансформатор или непосредственно. В последних двух случаях надо соблюдать осторожность с заземлением аппаратуры, питаемой данным выпрямителем, так как может получиться короткое замыкание электрической сети на землю.

Очень важно, чтобы выпрямитель обладал достаточно высокой надежностью, т. е. он не должен выходить из строя от перегрева каких-то своих элементов или от пробоя изоляции в них.

51. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Простейшая схема для выпрямления переменного тока показана на рис. 105, а. В ней последовательно соединены генератор G переменной ЭДС, диод D и нагрузка R , которую можно вклю-

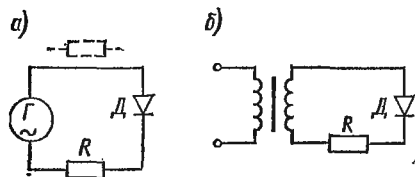


Рис. 105. Простейшие выпрямительные схемы

также не только со стороны катода диода, но и со стороны анода, т. е. между анодом и генератором, как показано штриховой линией на рис. 105, а. Эта схема называется обычно *однополупериодной схемой*, поскольку в ней ток проходит только в течение одного полупериода. Точнее подобную простей-

шую схему выпрямления надо называть *однофазной одноконтной*, так как генератор переменной ЭДС является однофазным и ток проходит через него только один раз за период и в одном направлении (один такт за период).

Существует еще много других более сложных схем для выпрямления (двухфазная, трехфазная, двухтактная и т. д.), но все они, как правило, представляют собой то или иное сочетание нескольких однофазных однотактных схем.

В выпрямителях, служащих для питания приемников, усилителей и другой аппаратуры, роль генератора переменной ЭДС обычно выполняет силовой трансформатор, включенный в электрическую сеть (рис. 105, б). Иногда выпрямитель питается непосредственно от сети без трансформатора. Нагрузкой R , т. е. потребителем энергии постоянного тока, являются цепи приемника или другого аппарата, которые питаются от данного выпрямителя. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать, что генератор дает синусоидальную ЭДС и имеет такое малое внутреннее сопротивление, что им можно пренебречь (если это сопротивление значительно, то его можно учесть). Будем также пренебрегать обратным током диода.

Работа простейшего выпрямителя происходит следующим образом. Во время одного полупериода напряжения на диоде, прямое и через него проходит ток, создающий на нагрузке R падение напряжения U_R . При перемене полярности ЭДС генератора, т. е. в течение следующего полупериода, напряжение на диоде обратное, тока практически нет и $U_R = 0$. Таким образом, через диод, нагрузку и генератор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полупериода и разделенных друг от друга промежутками также в полупериода. Этот ток будем называть *выпрямленным током*. Создаваемое им на нагрузке R напряжение назовем *выпрямленным напряжением*. Проследив направление тока, нетрудно установить полярность выпрямленного напряжения: со стороны катода диода всегда получается плюс, а со стороны анода — минус. Это правило следует хорошо помнить.

Процессы в выпрямителе можно наглядно показать с помощью графиков, представленных на рис. 106. Переменная ЭДС генератора изображена синусоидой с амплитудой E_m . Ток диода (выпрямленный ток) имеет форму импульсов в виде полусинусоид с максимальным значением I_{max} . График, изображающий ток, в другом масштабе может быть принят за график выпрямленного напряжения u_R . Действительно, ведь $u_R = iR$, т. е. напряжение u_R пропорционально току. Поэтому достаточно умножить значения тока на значение сопротивления и получим напряжение.

Последний график на рис. 106 показывает напряжение на диоде u_d . Нередко ошибочно считают, что это напряжение является синусоидальным. Часто также неправильно отождествляют его с напряжением источника переменной ЭДС. На самом деле напряжение на диоде имеет

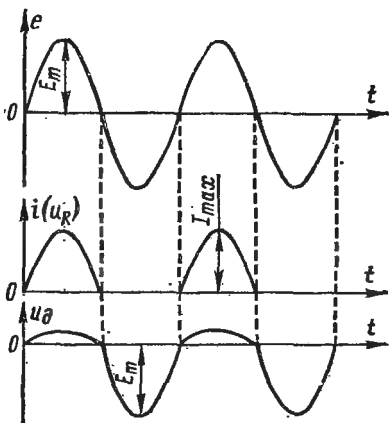


Рис. 106. Графики, поясняющие работу простейшей выпрямительной схемы

своеобразную несинусоидальную форму. У него амплитуды положительных и отрицательных полуволн резко неодинаковы. Амплитуда положительных полуволн очень мала. Это объясняется тем, что, когда проходит ток, почти все напряжение источника падает на нагрузке R , сопротивление которой, как правило, во много раз больше сопротивления диода. В этом случае, очевидно, можно написать:

$$U_{d \max} = E_m - U_{R \max} = E_m - I_{\max} R.$$

Для полупроводниковых диодов прямое напряжение обычно бывает около десятых долей вольта (не более одного вольта). Например, если источник имеет действующее напряжение $E = 20$ В, то $E_m = 1,4 \cdot 20 = 28$ В, и если $U_{d \max} = 1$ В, то $U_{R \max} = 27$ В.

Если бы напряжение источника полностью было приложено к диоду, то это означало бы, что на нагрузке R нет никакого падения напряжения.

Но это было бы возможно только при $R = 0$. Тогда ток имел бы недопустимо большое значение и диод вышел бы из строя.

При отрицательной полуволне тока нет и падение напряжения на нагрузке R равно нулю. Все напряжение источника приложено к диоду и является обратным напряжением. Таким образом, максимальное значение обратного напряжения равно амплитуде ЭДС источника E_m .

Рассмотрим более подробно напряжение, полученное на нагрузке. Все, что будет показано для него, относится также и к току. Из рис. 106 следует, что выпрямленное напряжение сильно пульсирует, т. е. является непостоянным.

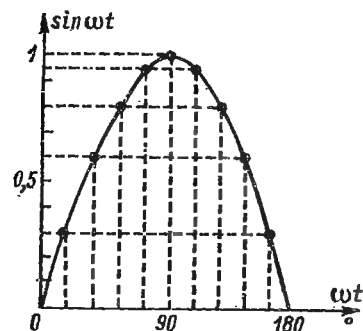


Рис. 107. График для определения среднего значения синуса за полупериод

Полпериода напряжения вообще нет. Полезной составной частью такого напряжения является только его *постоянная составляющая* или *среднее значение* U_0 . Это среднее значение за полупериод для синусоидального импульса с максимальным значением $U_{\max}$ равно

$$U_0 = 2U_{\max}/\pi = 0,636U_{\max} \approx 0,64U_{\max}.$$

Это соотношение можно приблизительно получить, если разбить полупериод, например, на 10 равных частей, каждая из которых будет соответствовать 18° (рис. 107), и найти среднее значение синуса. Как видно из рис. 107, надо один раз взять значения синуса, равные 0 и 1 (значение синуса, равное нулю в конце полупериода, не следует учитывать, так как оно является началом следующего полупериода). Значения $\sin 18^\circ = 0,31$, $\sin 36^\circ = 0,59$, $\sin 54^\circ = 0,81$ и $\sin 72^\circ = 0,95$ надо взять каждое два раза. Складывая все эти значения и разделив сумму на 10, получим: $(0 + 2 \cdot 0,31 + 2 \cdot 0,59 + 2 \cdot 0,81 + 2 \cdot 0,95 + 1) : 10 = 0,632$.

Полученное среднее значение синуса за полупериод близко к его более точному значению 0,636.

Так как в течение одного полупериода напряжения совсем нет, то за весь период среднее значение будет вдвое меньше:

$$U_0 = U_{\max}/\pi = 0,318U_{\max} \approx 0,32U_{\max}.$$

Приближенно можно считать, что U_0 составляет 30 % максимального значения. Это приближение вполне допустимо, если учесть, что действительные импульсы выпрямленного тока отличаются по форме от полусинусоид из-за нелинейности характеристики диода. Имея в виду, что падение напряжения на самом диоде очень мало, можно считать

$$U_{R\max} \approx E_m \text{ и } U_0 \approx 0,3E_m.$$

Вычитая из выпрямленного пульсирующего напряжения значение U_0 , получим переменную составляющую, которая имеет резко несинусоидальную форму. Для переменной составляющей нулевой осью является прямая линия, изображающая постоянную составляющую (рис. 108, а). На этом рисунке полуволны переменной составляющей заштрихованы. Как видно, положительная полуволна представляет собой верхние две трети полусинусоиды, а отрицательная полуволна имеет трапецевидную форму. Длительности этих полуволн неодинаковы, но площади их, конечно, равны, так как постоянная составляющая уже выделена.

Переменная составляющая является вредной частью выпрямленного напряжения. Для уменьшения переменной составляющей или, как говорят, для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения применяют специальные сглаживающие фильтры, которые рассмотрены в следующем параграфе.

На рис. 108, б переменная составляющая изображена отдельно. Она состоит из нескольких гармоник. Труднее всего уменьшить первую гармонику, которая на рис. 108, б показана штриховой синусоидой. Сглаживающие фильтры работают тем более эффективно, чем выше частота пульсаций. Поэтому если фильтр в нужной степени ослабляет первую гармонику пульсаций, то вторая, третья и более высокие гармоники подавляются в еще большей степени. А так как они всегда по амплитуде меньше, чем первая гармоника, то практически о борьбе с ними не надо заботиться. Важно лишь в достаточной степени подавить первую гармонику.

В рассматриваемой простейшей схеме выпрямителя первая гармоника пульсаций очень велика. Оказывается, что ее амплитуда U_{m1} больше полезной постоянной составляющей и равна

$$U_{m1} = 0,5U_{\max} = 0,5U_0/0,318 = 1,57U_0.$$

Принято значение пульсаций оценивать коэффициентом пульсаций p , который равен отношению амплитуды первой гармоники переменной составляющей к постоянной составляющей. В данном случае:

$$p = U_{m1}/U_0 = 1,57.$$

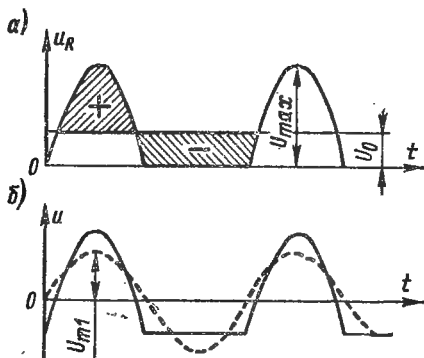


Рис. 108. Графики постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения

В двухполупериодных схемах выпрямителей используются обе полу- волны тока, образующие после выпрямления пульсирующий ток.

Двухполупериодная схема, представленная на рис. 109, а, имеет два диода, а вторичная обмотка трансформатора имеет вывод от средней (нулевой) точки и должна давать напряжение вдвое большее, чем при однополупериодном выпрямлении. Оба диода работают поочередно.

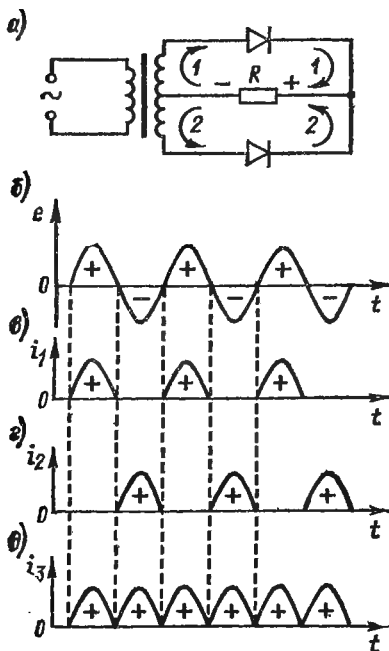


Рис. 109. Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой и графики процесса выпрямления

по значению, чем при однополупериодном выпрямлении. Амплитуда первой гармоники этой составляющей равна

$$U_{m1} \approx 0,42U_{\max}.$$

Коэффициент пульсаций для двухполупериодной схемы равен

$$\rho = U_{m1}/U_0 = 0,42U_{\max}/(0,64U_{\max}) \approx 0,67,$$

т. е. он стал в два раза меньше, но все же еще пульсации очень велики.

Максимальное обратное напряжение на каждом диоде в схеме по рис. 109 доходит до амплитудного значения напряжения всей обмотки трансформатора, т. е. в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении. Это является недостатком данной схемы и препятствует ее использованию при высоких напряжениях.

В первую половину периода работают один диод и одна половина обмотки. Ток проходит по стрелке 1. Во вторую половину периода прямое напряжение получается на другом диоде и ток проходит от второй половины обмотки по стрелке 2. В нагрузке оба тока проходят в одном направлении и создают суммарный ток (рис. 109, д). Кривая б изображает напряжение вторичной обмотки трансформатора, кривые в и г — выпрямленные токи для каждого диода. Схему рис. 109 было бы правильнее называть *двухфазной*, так как вторичная обмотка трансформатора является источником двухфазной ЭДС, т. е. дает две ЭДС, равные по значению, но противоположные по фазе (со сдвигом фаз 180°).

Постоянная составляющая выпрямленного тока и напряжения при двухполупериодном выпрямлении получается в два раза больше, чем для однополупериодной схемы.

$$U_0 \approx 0,64U_{\max}.$$

Переменная составляющая выпрямленного напряжения имеет удвоенную частоту по сравнению с частотой питающего тока и несколько меньше

На рис. 110 показана мостовая схема, также дающая двухполупериодное выпрямление. У нее повышающая обмотка рассчитана на одинарное напряжение и не имеет средней точки. Недостаток схемы — необходимость применения четырех диодов. Прохождение тока в первый полупериод показывают стрелки 1, во второй полупериод — стрелки 2.

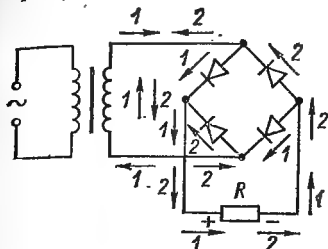


Рис. 110. Мостовая схема выпрямителя

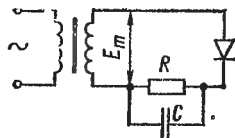


Рис. 111. Выпрямитель с конденсатором, сглаживающим пульсации

Ток проходит последовательно через два диода, и поэтому потери напряжения на их внутреннем сопротивлении удвоенные по сравнению с выпрямителем, представленным на схеме рис. 109.

Обратное максимальное напряжение на каждом диоде мостовой схемы равно амплитудному напряжению трансформатора, т. е. в два раза меньше, чем в схеме рис. 109.

52. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Простейшим и весьма эффективным методом сглаживания пульсаций является применение конденсатора, шунтирующего нагрузку R (рис. 111). Этот метод широко распространен, и его следует рассмотреть подробно.

Конденсатор хорошо сглаживает пульсации, если его емкость достаточно велика, так что выполняется условие

$$1/(\omega_n C) \ll R,$$

где ω_n — частота пульсаций.

Для рассмотрения работы схемы по рис. 111 надо также учитывать, что сопротивление нагрузки практически всегда значительно больше сопротивления диода $R \gg R_d$.

Во время некоторой части положительного полупериода, когда напряжение на диоде прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор до напряжения, приближающегося к E_m . В тот промежуток времени, когда напряжение на диоде обратное и ток через диод не проходит, конденсатор разряжается на нагрузку R и поддерживает на ней напряжение, которое постепенно снижается. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается и напряжение на нем повышается.

Заряд конденсатора происходит довольно быстро, так как внутреннее сопротивление выпрямителя $R_{вн}$, которое складывается из сопротивления диода R_d и сопротивления вторичной обмотки трансформатора R_2 , сравнительно мало. Разряд конденсатора на нагрузку, име-

ющую значительно большее сопротивление, совершается гораздо медленнее.

Как мы знаем, скорость заряда или разряда конденсатора в цепи с активным сопротивлением характеризуется постоянной времени, которая определяет длительность заряда или разряда. В данном случае $\tau_{\text{зар}} = R_{\text{вн}}C$ и $\tau_{\text{раз}} = RC$. Но $R_{\text{вн}} \ll R$ и поэтому $\tau_{\text{зар}} \ll \tau_{\text{раз}}$. Кроме того, практически обычно всегда получается, что $\tau_{\text{раз}}$ значительно больше, чем период пульсаций $T_{\text{п}}$, т. е. за время от одного импульса тока до другого конденсатор успевает лишь немного разрядиться.

Для примера проверим эти соотношения для выпрямителя, работающего при частоте $f_{\text{п}} = 50$ Гц, если $R = 4$ кОм, $R_{\text{вн}} = 200$ Ом и $C = 40$ мкФ. В этом случае период пульсаций равен

$$T_{\text{п}} = 1/f_{\text{п}} = 1/50 = 0,02 \text{ с},$$

а полупериод составляет 0,01 с.

Постоянная времени заряда равна $\tau_{\text{зар}} = R_{\text{вн}}C = 200 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0,008$ с. Как видно, $\tau_{\text{зар}}$ получилась одного порядка с длительностью полупериода. Вообще же $\tau_{\text{зар}}$ в зависимости от значения $R_{\text{вн}}$ и C может быть как больше, так и меньше, чем полупериод.

Постоянная времени разряда равна $\tau_{\text{раз}} = RC = 4 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0,16$ с $\gg 0,008$ с.

В данном случае $\tau_{\text{раз}}$ в 20 раз больше, чем $\tau_{\text{зар}}$. Это объясняется тем, что R в 20 раз больше, нежели $R_{\text{вн}}$. Кроме того, $\tau_{\text{раз}}$ в 16 раз больше полупериода.

Теперь подсчитаем емкостное сопротивление конденсатора $x_C = 1/(2\pi fC) \approx 1/(6,28 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6}) = 80$ Ом. Оно, действительно, гораздо меньше, чем сопротивление нагрузки.

Весьма наглядно можно показать процессы, происходящие в схеме, представленной на рис. 111, с помощью графиков. На рис. 112, а показаны такие графики для случая, когда сопротивление нагрузки бесконечно велико. Синусоида изображает переменную ЭДС источника e , а ломаная линия показывает напряжение на конденсаторе u_C .

Пусть источник включается в начале положительной полуволны ЭДС. Тогда через диод будет проходить импульс тока (он заштрихован на рис. 112, а), заряжающий конденсатор, на котором будет расти напряжение. Для упрощения на рис. 112, а показано, что этот рост совершается по линейному закону, но на самом деле он более сложен. Однако это не имеет существенного значения и можно приблизительно изображать кривую изменения напряжения при заряде прямой линией.

Напряжение, получающееся на конденсаторе, приложено плюсом к катоду диода (ведь со стороны катода всегда получается плюс выпрямленного напряжения), т. е. оно является обратным для диода. Поэтому напряжение на диоде равно разности ЭДС источника и напряжения конденсатора:

$$u_{\text{д}} = e - u_C.$$

Пока ЭДС источника больше напряжения конденсатора, напряжение на диоде прямое и ток через диод проходит. На графике рис. 112, а значение $u_{\text{д}}$ определяется отрезком между кривыми e и u_C . Такой отрезок показан для некоторого момента времени. Ток через диод изменяется соответственно изменению напряжения на нем. Когда $u_{\text{д}}$ достигает максимума, то и ток становится наибольшим. Заметим, что максимум тока несколько опережает максимум ЭДС, как это и должно быть для цепи, имеющей емкость.

В некоторый момент ЭДС источника, уменьшающаяся после прохождения через амплитудное значение, станет равной напряжению на конденсаторе (точка пересечения кривых e и u_C на графике). Тогда напряжение на диоде станет равно нулю и прохождение тока через диод прекратится. Так как сопротивление $R = \infty$, т. е. цепь нагрузки разомкнута, то конденсатор не разряжается и на нем сохраняется постоянным то наибольшее напряжение, до которого он успел зарядиться (горизонтальная линия на графике). Но в это время ЭДС источника продолжает уменьшаться, проходит через нуль и становится отрицательной. В течение всего этого промежутка времени к диоду приложено обратное напряжение, максимум которого $U_{обр}$ показан на рис. 112, а.

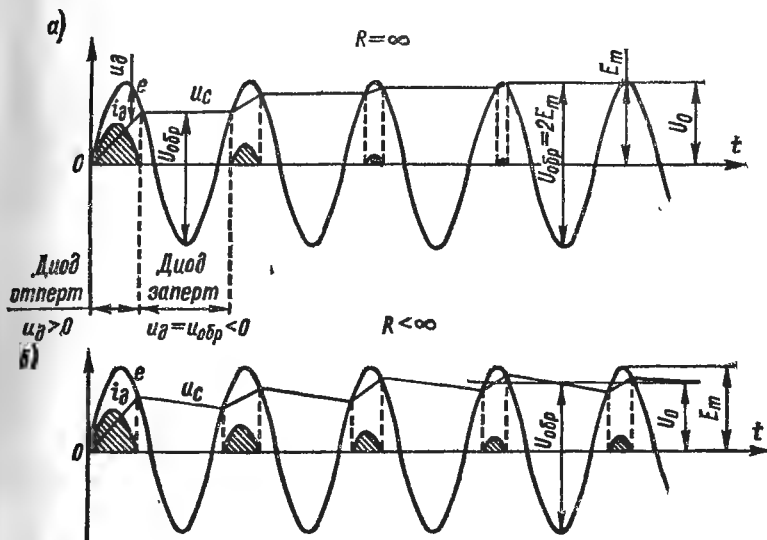


Рис. 112. Сглаживание пульсаций конденсатором при различных сопротивлениях нагрузки

Когда наступит следующий положительный полупериод, то нарастающая ЭДС в какой-то момент достигнет значения u_C и превысит его. Теперь напряжение на диоде снова прямое, через диод будет проходить второй импульс тока и конденсатор станет подзаряжаться. Но так как на конденсаторе напряжение довольно велико, то на диоде прямое напряжение получается уже значительно меньшим и существует меньший промежуток времени, чем в первый положительный полупериод. Соответственно этому, второй импульс тока также имеет меньшее значение и длительность. Как только опять станет $e = u_C$, диод запрется и на конденсаторе снова будет сохраняться постоянное напряжение, уже более высокое, чем ранее.

Во время третьего положительного полупериода снова произойдет подзаряд конденсатора, но напряжение на диоде и импульс тока станут еще меньше.

Предположим, что во время некоторой части четвертого положительного полупериода пройдет еще небольшой ток и конденсатор зарядится до напряжения E_m . Тогда в любой момент времени $e \leq u_c$ и $u_d \leq 0$, это иллюстрируется графиком на рис. 113, а, изображающим напряжение на диоде. Диод будет все время заперт. Никакой подзарядки конденсатора уже происходить не может, и на конденсаторе получится постоянное напряжение $U_0 = E_m$. Пульсация в этом случае совершенно отсутствует ($p = 0$). На графике рис. 112, а для примера показано, что переходный процесс от момента включения длится немного более трех периодов, после чего наступает установившийся режим. Практи-

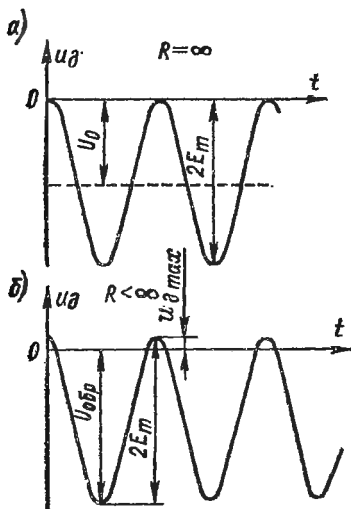


Рис. 113. График напряжения на диоде при различных сопротивлениях нагрузки

бражены на рис. 112, б, причем для примера показано, что установившийся режим начинается с третьего положительного полупериода.

Разница с предыдущим режимом заключается в том, что в промежутке времени, когда заряда нет, конденсатор разряжается. Поэтому напряжение на нем уже не может быть строго постоянным и равным E_m . Но так как разряд происходит гораздо медленнее заряда, то при установившемся режиме среднее значение напряжения на конденсаторе (а значит и на нагрузке) все же остается высоким. Оно приближается к E_m и может быть около $(0,8 \div 0,95) E_m$ и выше.

Таким образом, при наличии конденсатора постоянное напряжение выпрямителя может быть выше действующего значения напряжения вторичной обмотки питающего трансформатора и приближается к амплитудному значению этого напряжения. Например, если действующее значение напряжения трансформатора 30 В, то его амплитудное значение равно $1,4 \cdot 30 = 42$ В. Если постоянное напряжение

чически в зависимости от соотношения между постоянными времени $\tau_{раз}$, $\tau_{зар}$ и периодом T переходный процесс может иметь большую или меньшую длительность.

Таким образом, при $R = \infty$ конденсатор не только идеально сглаживает пульсации, но и повышает полезное постоянное напряжение до значения амплитуды ЭДС источника. А ведь при отсутствии конденсатора $p = 1,57$ и $U_0 \approx 0,3 U_{max} \approx 0,3 E_m$, т. е. конденсатор повышает U_0 более чем в три раза. Но при этом максимальное обратное напряжение, очевидно, равно $2E_m$, т. е. оно вдвое больше, нежели при отсутствии конденсатора.

Режим работы при $R = \infty$ является вполне реальным и может быть на практике, так как иногда требуется подать только одно напряжение, а ток не нужен. Однако в подавляющем большинстве случаев сопротивление нагрузки R имеет некоторое конечное значение.

Графики, иллюстрирующие процессы для таких случаев, изо-

бражены на рис. 112, б, причем для примера показано, что уста-

на конденсаторе составляет $0,8 E_m$, то оно равно $U_0 = 0,8 \cdot 42 \approx 33,6 \text{ В}$, т. е. больше 30 В.

Чем больше емкость C и сопротивление R , т. е. чем больше $\tau_{\text{раз}}$, тем меньше пульсации и тем ближе напряжение U_0 к E_m . Практически емкость C берут настолько большой, чтобы коэффициент пульсаций получался не более 10 %. Если сопротивление R небольшое, т. е. велик ток разряда или емкость C мала, то разряд конденсатора происходит слишком быстро. Тогда пульсации получаются большими и постоянная составляющая напряжения U_0 незначительно превышает $0,3 E_m$ (рис. 114). В этом случае конденсатор почти не дает полезного эффекта.

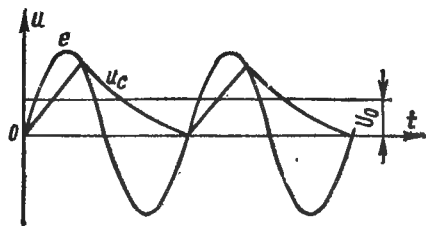


Рис. 114. Выпрямленное напряжение при малых значениях R и C

Представляют интерес токи в цепях выпрямительной схемы. Их графики представлены на рис. 115. Ток в диоде i_d , направление которого возьмем за положительное, как было показано, представляет собой импульсы с длительностью меньше полупериода. Ток в нагрузке i_R по форме подобен напряжению, что следует из закона Ома: $i_R = u_C/R$. Особую форму имеет ток i_C , протекающий в емкостной ветви. Его можно найти, если учесть, что в любой момент времени должно быть $i_R + i_C = i_d$. Ток i_C является переменным и не содержит постоянной составляющей, так как через конденсатор постоянный ток не проходит.

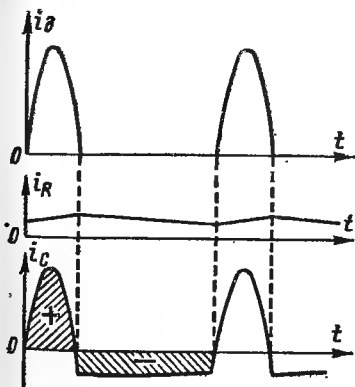


Рис. 115. Токи в цепях выпрямителя

Когда существует в диоде ток, то конденсатор заряжается и его ток имеет форму импульса несколько меньшей амплитуды, чем импульс тока диода $i_C = i_d - i_R$. Во время разряда конденсатора ток диода равен нулю и тогда $i_C + i_R = 0$ или $i_C = -i_R$. Действительно, ток i_R в это время представляет собой не что иное, как ток разряда конденсатора i_C . Но при выбранном положительном направлении надо ток разряда конденсатора считать отрицательным, а ток i_R все время сохраняет одно направление.

Таким образом, ток i_C имеет положительную полуволну в виде большого кратковременного импульса, а отрицательная полуволна имеет форму трапеции. Площади этих полуволн, конечно, равны.

Для работы диода существенным является значение импульсов тока, идущих, главным образом, на заряд конденсатора. Эти импульсы не должны превосходить предельный ток, указанный для данного диода.

Импульсы особенно велики при включении выпрямителя, когда конденсатор еще совсем не заряжен. Чтобы эти импульсы не вызывали разрушение диода, иногда последовательно с ним включают ограничительный резистор.

Следует отметить, что в рассматриваемом режиме максимальное обратное напряжение лишь немного ниже чем $2E_m$. На рис. 113, б показан график напряжения на диоде. В течение небольшой части периода оно прямое, причем его наибольшее значение $u_{d \max}$, как мы знаем, невелико. Наибольшее обратное напряжение

$$U_{\text{обр}} = 2E_m - u_{d \max} \approx 2E_m.$$

При размыкании цепи нагрузки $U_{\text{обр}} = 2E_m$. Поэтому подбирают диод по предельному обратному напряжению $U_{\text{обр. пред}}$ так, чтобы выполнялось условие:

$$U_{\text{обр}} = 2E_m \leq U_{\text{обр. пред.}}$$

Работу выпрямителя с конденсатором, сглаживающим пульсации, можно пояснить с помощью следующей аналогии. Представим себе, что некоторому потребителю надо подавать по трубе газ с постоянным давлением, чтобы поток газа был равномерным. Но имеющийся нагнетательный насос с двигателем может накачивать газ только толчками (импульсами), так как во время одного хода поршня газ всасывается в насос, а к потребителю перегоняется лишь во время обратного хода. Работа такого насоса аналогична работе выпрямителя без конденсатора, причем двигатель, придающий поршню колебательное движение то в одну сторону, то в другую, подобен источнику переменной ЭДС, а клапаны насоса выполняют роль диода. Если теперь между насосом и потребителем поставить большой резервуар, то можно накачать в него газ, который будет там находиться под некоторым давлением. Из этого резервуара газ будет подаваться потребителю с почти постоянным давлением. Давление будет лишь незначительно пульсировать, так как насос все время толчками подкачивает газ в резервуар и тем самым поддерживает в нем среднее давление на одном и том же уровне. Очевидно, что резервуар подобен конденсатору. Чем больше его емкость и чем слабее поток газа, идущий к потребителю, тем меньше пульсации давления.

Точный расчет коэффициента пульсаций при наличии конденсатора весьма сложен. Однако если величина p не превышает 10 %, то ее можно рассчитать приближенно на основании весьма простых соображений.

В установившемся режиме количество электричества, получаемое конденсатором при заряде, равно количеству электричества, отдаваемого конденсатором при разряде. Если обозначить изменение напряжения на конденсаторе в зависимости от пульсаций через Δu , то количество электричества, получаемое конденсатором при каждом подзаряде, равно:

$$Q = C \Delta u.$$

Это количество электричества отдается конденсатором при разряде. Его можно выразить через среднее значение тока I_0 и время разряда $t_{\text{раз}}$, которое приближенно равно периоду пульсаций T_p :

$$Q = I_0 t_{\text{раз}} \approx I_0 T_p.$$

Такое приближение не дает значительной погрешности при малых пульсациях.

Из написанных выражений получаем:

$$C \Delta u \approx I_0 T_{\Pi} \text{ или } \Delta u \approx I_0 T_{\Pi} / C.$$

Заменяя T_{Π} через частоту пульсаций f_{Π} , можно написать:

$$\Delta u \approx I_0 / (f_{\Pi} C).$$

Анализ кривой пульсаций, представляющей собой ломаную линию, показывает, что первая гармоника напряжения пульсаций в π раз меньше, чем Δu

$$U_{m1} \approx I_0 / (\pi f_{\Pi} C),$$

отсюда для коэффициента пульсаций получаем:

$$p \approx U_{m1} / U_0 \approx I_0 / (\pi f_{\Pi} C U_0).$$

Но так как $U_0 / I_0 = R$, то

$$p \approx 1 / (\pi f_{\Pi} C R).$$

Эта простая формула дает достаточную для практических расчетов точность, если p не превышает 0,1. Чем меньше значение p , тем точнее результат. При $R = \infty$ формула дает совершенно точный результат $p = 0$. Зато при $C = 0$ получаем по формуле $p = \infty$, что является

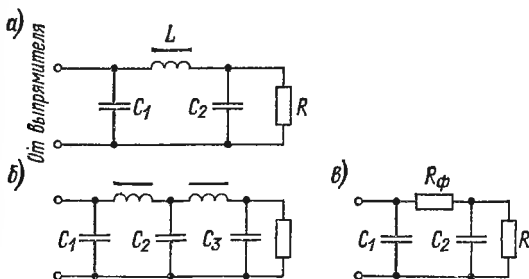


Рис. 116. Различные схемы сглаживающих фильтров

абсурдом, так как в действительности без конденсатора $p = 1,57$. Вычисленное по этой формуле значение p несколько преувеличено, т. е. в действительности пульсации получаются несколько меньшими. Зная коэффициент пульсаций и зная сопротивление нагрузки R , можно найти необходимую емкость конденсатора.

Пример. Найти коэффициент пульсаций p , если $f_{\Pi} = 50$ Гц, $C = 20$ мкФ и $R = 8$ кОм.

Решение. $p = 10^6 / (3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-3} = 0,4 \%$.

Если нужно получить очень малый коэффициент пульсаций или если сопротивление R мало, то значение емкости оказывается чрезмерно большим и, следовательно, сглаживание пульсаций с помощью одного конденсатора осуществить практически нельзя. Тогда после конденсатора включают дополнительный сглаживающий фильтр, состоящий из дросселя с большим индуктивным сопротивлением и еще одного конденсатора.

Схема такого индуктивно-емкостного фильтра дана на рис. 116, а. Конденсаторы фильтра обычно применяются оксидные, емкостью

около десятков или сотен микрофард. Дроссель делается с ферромагнитным сердечником и для получения индуктивности в несколько десятков генри имеет обмотку, состоящую из нескольких тысяч витков.

В самом упрощенном виде работу фильтра можно представить себе следующим образом. Переменные составляющие выпрямленного тока проходят через конденсатор C_1 , обладающий для них малым сопротивлением. Зато дроссель представляет собой большое индуктивное сопротивление и почти не пропускает эти токи. Для постоянной же составляющей провод дросселя имеет небольшое сопротивление. Поэтому потеря постоянной составляющей напряжения на дросселе незначительна. Так как часть переменной составляющей тока все же проходит через дроссель, то параллельно нагрузке R включен еще конденсатор C_2 , сопротивление которого мало по сравнению с R . Тогда большая часть переменного тока, прошедшего дроссель, замыкается через C_2 и в нагрузку R не попадает. Чем больше индуктивное сопротивление дросселя и чем меньше емкостное сопротивление конденсаторов, тем лучше фильтр сглаживает пульсации.

Рассмотрим теперь действие фильтра более подробно. Конденсатор C_1 , по существу, работает так же, как и в случае, когда в качестве сглаживающего фильтра применяется только один конденсатор.

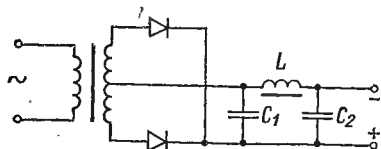


Рис. 117. Схемы выпрямителя с фильтром

Переменное напряжение пульсаций, которое все же имеется на конденсаторе C_1 , подается на дроссель и конденсатор C_2 , которые служат делителем напряжения (рис. 116, а). Индуктивное сопротивление дросселя во много раз больше, чем емкостное сопротивление кон-

денсатора C_2 . Поэтому большая часть переменного напряжения падает на L и лишь малая его часть будет на C_2 и нагрузке R , присоединенной параллельно C_2 . Сглаживающий фильтр действует тем лучше, чем выше частота пульсаций, так как тогда возрастает индуктивное сопротивление дросселя и уменьшается емкостное сопротивление конденсаторов. Лучше сглаживаются пульсации при двухполупериодном выпрямлении, когда частота их равна 100 Гц.

Мы рассмотрели действие одного звена (одной ячейки) фильтра. Для лучшего сглаживания иногда применяют фильтры из двух-трех звеньев. Пример двухзвенного фильтра показан на рис. 116, б. Конденсатор C_1 , дроссель L_1 и конденсатор C_2 составляют одно звено. Одновременно конденсатор C_2 является входным или первым конденсатором для второго звена фильтра, в которое входят второй дроссель L_2 и конденсатор C_3 . Когда необходимый выпрямленный ток мал и допустима некоторая потеря постоянного напряжения, вместо дросселя для удешевления и упрощения фильтра включают резистор R_ϕ с сопротивлением (рис. 116, в) порядка единиц или десятков килоом.

Полная схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром показана на рис. 117.

Для определения напряжения U_0 , поступающего от выпрямителя при том или ином токе нагрузки I_0 , служит *внешняя характеристика* выпрямителя. На рис. 118 даны такие характеристики для однополупериодного выпрямителя при работе его без фильтра (кривая 1) и с фильтром, имеющим на входе конденсатор C_1 (кривая 2). Характе-

истики показывают, что в режиме холостого хода ($I = 0$) при отсутствии конденсатора $U_0 = 0,32 E_m$, а при наличии конденсатора $U_0 = E_m$, где E_m — амплитудное значение ЭДС трансформатора. Понижение напряжения при увеличении тока объясняется возрастанием потери напряжения внутри выпрямителя, сопротивление которого складывается из внутреннего сопротивления диода и сопротивлений обмоток трансформатора и дросселя. При наличии конденсатора C_1 сказывается и более быстрый разряд конденсатора, если уменьшено сопротивление нагрузки. Для больших токов конденсатор уже не повышает напряжения, так как он очень быстро разряжается (кривая 2 сливается с кривой 1). Обе кривые приходят в точку короткого замыкания, для которой тоже обозначен I_k . Работа выпрямителя при таких больших токах недопустима и невыгодна, поскольку напряжение получается низким.

Как мы знаем, первый конденсатор фильтра C_1 , повышая выпрямленное напряжение, вместе с тем увеличивает обратное напряжение на диоде. Во всех выпрямителях максимальное обратное напряжение при наличии конденсатора C_1 примерно равно $2E_m$, причем в двухполупериодном выпрямителе (рис. 109) E_m есть напряжение одной половины обмотки трансформатора. Только в мостовой схеме (см. рис. 110)

обратное напряжение вдвое меньше, чем в остальных схемах, т. е. $U_{обр} = E_m$ независимо от наличия конденсатора C_1 .

Рассмотрим теперь кратко расчет пульсаций напряжения, получающегося после сглаживающего фильтра.

Пульсации напряжения на первом конденсаторе C_1 , т. е. на входе фильтра, могут быть определены по формуле, которая применялась для случая сглаживания пульсации одним конденсатором, т. е.

$$U_{m1\text{ вх}} \approx U_0 / (\pi f_n C_1 R) \text{ или } p_1 \approx 1 / (\pi f_n C_1 R).$$

Применение этой формулы допустимо, так как влияние дросселя на разряд конденсатора C_1 можно не учитывать. Действительно, при сравнительно медленном изменении напряжения ток разряда, протекающий через дроссель, также меняется весьма медленно и индуктивное сопротивление дросселя для такого тока невелико по сравнению с сопротивлением нагрузки.

Дальнейшее сглаживание пульсаций дает Г-образный фильтр, состоящий из дросселя L (или резистора R_Φ) и второго конденсатора C_2 . Величина, показывающая, во сколько раз фильтр уменьшает пульсации, называется коэффициентом фильтрации или коэффициентом сглаживания k_Φ . Обычно k_Φ определяется для первой гармоники пульсаций. Он равен отношению напряжений пульсаций на входе и на выходе фильтра:

$$k_\Phi = U_{m1\text{ вх}} / U_{m1\text{ вых}},$$

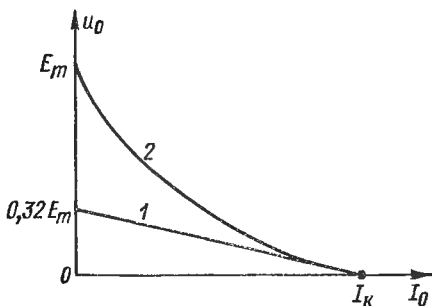


Рис. 118. Внешние характеристики однополупериодного выпрямителя при работе без фильтра (1) и с фильтром, имеющем на входе конденсатор (2)

отсюда следует, что

$$U_{m1 \text{ вых}} = U_{m1 \text{ вх}} / k_{\phi}.$$

Для индуктивно-емкостного (дрессельного) фильтра k_{ϕ} вычисляется по формуле:

$$k_{\phi} \approx \omega_{\Pi}^2 L C_2 = 4\pi^2 f_{\Pi}^2 L C_2 \approx 40 f_{\Pi}^2 L C_2,$$

а для реостатно-емкостного фильтра $R_{\phi} C_2$ формула расчета имеет вид:

$$k_{\phi} \approx \omega_{\Pi} R_{\phi} C_2 = 2\pi f_{\Pi} R_{\phi} C_2 \approx 6,25 f_{\Pi} R_{\phi} C_2.$$

Обе формулы справедливы для случаев, когда k_{ϕ} значительно больше единицы. Именно эти случаи представляют интерес, так как фильтр, у которого k_{ϕ} немногим больше единицы, нет смысла применять.

Приведенные расчетные формулы легко получаются на основании следующих соображений. Для индуктивно-емкостного фильтра с дросселем можно пренебречь активным сопротивлением дросселя и сопротивлением нагрузки R , которое всегда во много раз больше емкостного сопротивления x_{C_2} конденсатора C_2 . Тогда следует считать, что напряжение пульсаций распределяется между последовательно соединенными участками с индуктивным сопротивлением дросселя x_L и емкостным сопротивлением x_{C_2} . Так как для последовательной цепи напряжения пропорциональны сопротивлениям участков, то

$$k_{\phi} = U_{m1 \text{ вх}} / U_{m1 \text{ вых}} \approx (x_L - x_{C_2}) / x_{C_2}.$$

Но так как $x_L \gg x_{C_2}$, то

$$k_{\phi} \approx x_L / x_{C_2} = \omega_{\Pi} L / \frac{1}{\omega_{\Pi} C_2} = \omega_{\Pi}^2 L C_2.$$

Подобно этому, для реостатно-емкостного фильтра

$$k_{\phi} \approx \sqrt{R_{\phi}^2 + x_{C_2}^2} / x_{C_2}.$$

При условии $R_{\phi} \gg x_{C_2}$, которое всегда выполняется для того, чтобы фильтр хорошо сглаживал пульсации, получаем

$$k_{\phi} \approx R_{\phi} / x_{C_2} = R_{\phi} / \frac{1}{\omega_{\Pi} C_2} = \omega_{\Pi} R_{\phi} C_2.$$

Пример 1. Найти значение пульсации напряжения на выходе фильтра, имеющего $C_1 = C_2 = 20$ мкФ и $L = 40$ Гн, если выпрямитель дает $U_0 = 25$ В и питает нагрузку сопротивлением $R = 5$ кОм; $f_{\Pi} = 100$ Гц.

Решение. $U_{m1 \text{ вх}} \approx U_0 / (\pi f_{\Pi} C_1 R) = 25 / (3,14 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3) \approx 0,8$ В, т. е. напряжение пульсаций лишь немного больше 3 % и, следовательно, расчет имеет достаточную точность.

Коэффициент фильтрации Г-образной части фильтра равен $k_{\phi} \approx 40 f_{\Pi}^2 L C_2 = 40 \cdot 100^2 \cdot 40 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 320$.

Следовательно, пульсации на выходе фильтра $U_{m1 \text{ вых}} = 0,8 / 320 = 0,0025$ В.

Пример 2. Найти для предыдущего примера $U_{m1 \text{ вых}}$, если дроссель заменен резистором с сопротивлением $R_{\phi} = 2$ кОм.

Решение. $k_{\phi} \approx 6,25 f_{\Pi} R_{\phi} C_2 = 6,25 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \approx 25$ и $U_{m1 \text{ вых}} = 0,8 : 25 = 0,032$ В.

Как видно, реостатно-емкостный фильтр сглаживает пульсации значительно хуже, чем индуктивно-емкостный.

С помощью приведенных формул можно также рассчитать фильтр, задавшись напряжением пульсаций на выходе фильтра, т. е. на нагрузке. Поясним это следующим примером.

Пример 3. Двухполупериодный выпрямитель ($f_H = 100$ Гц) с индуктивно-емкостным фильтром должен давать на нагрузке сопротивлением $R = 10$ кОм постоянное напряжение $U_0 = 30$ В, причем напряжение пульсаций $U_{m1вх}$ допускается не более 0,001 В. Рассчитать индуктивность дросселя фильтра, если конденсаторы фильтра имеют емкость $C_1 = C_2 = 40$ мкФ.

Решение. Напряжение пульсаций на первом конденсаторе фильтра $U_{m1вх} = U_0 / (\pi f_H C_1 R) = 30 / (3,14 \cdot 100 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3) \approx 0,24$ В.

Тогда коэффициент фильтрации Г-образной части фильтра, состоящей из дросселя L и конденсатора C_2 , должен быть не менее чем $k_f = U_{m1вх} / U_{m1вых} = 0,24 / 0,01 = 240$. А индуктивность дросселя определится по формуле $L = k_f^2 / (40 f_H^2 C_2) = 240^2 / (40 \cdot 100^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6}) = 15$ Гн.

53. ВЫПРЯМИТЕЛИ С УМНОЖЕНИЕМ НАПЯЖЕНИЯ

В схеме рис. 119, а трансформатор не имеет повышающей обмотки на двойное напряжение со средней точкой, но одновременно с двухполупериодным выпрямлением выпрямитель удваивает напряжение.

В первый полупериод через диод D_1 , напряжение на котором прямое, конденсатор C_1 заряжается примерно до амплитудного напряжения вторичной обмотки. Во второй полупериод прямое напряжение будет на диоде D_2 и через него точно так же заряжается конденсатор C_2 .

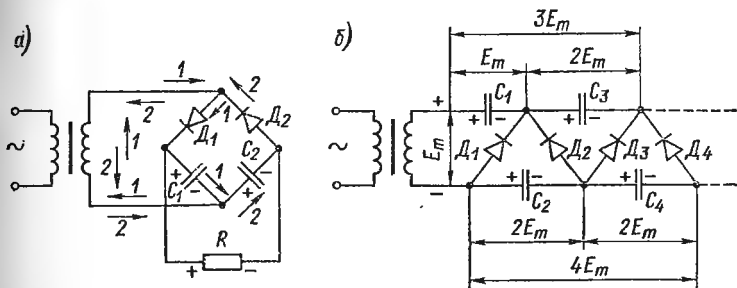


Рис. 119. Схемы выпрямителей с удвоением (а) и с учетверением (б) напряжения

Конденсаторы C_1 и C_2 соединены последовательно, и суммарное напряжение на них примерно равно двойному амплитудному напряжению трансформатора. Такое же максимальное обратное напряжение будет на каждом диоде. Одновременно с зарядом конденсаторов C_1 и C_2 происходит их разряд через нагрузку R , вследствие чего напряжение на конденсаторах понижается. Чем меньше сопротивление нагрузки R , т. е. чем больше ток нагрузки и чем меньше емкость конденсаторов C_1 и C_2 , тем быстрее они разряжаются и тем ниже напряжение на них. Поэтому практически удвоить напряжение нельзя. При емкости конденсаторов не менее 10 мкФ и токе нагрузки не более 100 мА можно получить напряжение больше даваемого трансформатором в 1,7 или даже в 1,9 раза.

Достоинством схемы является то, что конденсаторы сглаживают пульсации выпрямленного тока, как об этом было рассказано в предыдущем параграфе. Формула для расчета пульсаций, приведенная в этом параграфе, пригодна и для данной схемы, но вместо емкости C надо брать $C_1/2$, так как конденсаторы C_1 и C_2 равны по емкости и соединены последовательно.

Можно осуществить схемы выпрямителей с умножением напряжения в любое число раз. На рис. 119, б показана схема, дающая учетверение напряжения и имеющая четыре диода и четыре конденсатора. В нечетные полупериоды конденсатор C_1 заряжается через диод D_1 почти до амплитудного значения напряжения трансформатора E_m . Заряженный конденсатор C_1 сам является источником. Поэтому в четные полупериоды, для которых полярность напряжения трансформатора будет обратной, конденсатор C_2 заряжается через диод D_2 примерно до удвоенного напряжения $2E_m$. Это напряжение является максимальным значением суммарного напряжения последовательно соединенных трансформатора и конденсатора C_1 . Аналогично этому конденсатор C_3 заряжается в нечетные полупериоды через диод D_3 также до напряжения $2E_m$, которое является суммарным напряжением последовательно соединенных C_1 , трансформатора и C_2 (при этом надо учесть, что напряжения на C_1 и C_2 действуют навстречу друг другу).

Рассуждая подобным образом далее, найдем, что конденсатор C_4 будет заряжаться в четные полупериоды через диод D_4 опять до напряжения $2E_m$, которое является суммой напряжений на C_1 , C_3 , трансформаторе и C_2 . Конечно, заряд конденсаторов до указанных напряжений происходит постепенно в течение нескольких полупериодов после включения выпрямителя. В результате с конденсаторов C_2 и C_4 можно получить учетверенное напряжение $4E_m$. Одновременно с конденсаторов C_1 и C_3 можно получить утроенное напряжение $3E_m$. Если прибавить к схеме еще конденсаторы и диоды, включенные по тому же принципу, то от ряда конденсаторов C_1 , C_3 , C_5 и т. д. будут получаться напряжения, увеличенные в нечетное число раз (3, 5, 7 и т. д.), а от ряда конденсаторов C_2 , C_4 , C_6 и т. д. можно будет получать напряжения, увеличенные в четное число раз (2, 4, 6 и т. д.).

При включении нагрузки конденсаторы будут разряжаться и напряжение на них понизится. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем быстрее разряжаются конденсаторы и тем ниже становится напряжение на них. Поэтому при недостаточно больших сопротивлениях нагрузки использование подобных схем становится нерациональным. Практически такие схемы дают эффективное умножение напряжения только при небольших нагрузочных токах. Конечно, можно получить и большие токи, если увеличить емкость конденсаторов. Достоинством приведенной схемы является возможность получения высоких напряжений без высоковольтного трансформатора. Кроме того, конденсаторы должны иметь рабочее напряжение лишь $2E_m$, независимо от того, в какое число раз умножается напряжение, и каждый диод работает при максимальном обратном напряжении, равном только $2E_m$.

54. ДЕТАЛИ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Диоды выбирают по их основным параметрам: максимальному выпрямленному току $I_{0\max}$ и предельному обратному напряжению $U_{\text{обр.пред}}$. При наличии конденсатора на входе фильтра действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 во всех

схемах выпрямителей, за исключением мостовой, не должно превышать 35 % значения $U_{обр. пред.}$ У двухполупериодной схемы с нулевой точкой напряжение U_2 относится к одной половине обмотки. В мостовой схеме U_2 не должно превышать 70 % значения $U_{обр. пред.}$

Для выпрямления более высоких напряжений соединяют последовательно соответствующее число диодов.

При последовательном соединении германиевых и кремниевых диодов их обязательно шунтируют резисторами с одинаковыми сопротивлениями порядка десятков или сотен килоом (рис. 120). Если этого не сделать, то вследствие значительного разброса обратного сопротивления диодов обратное напряжение распределяется между ними неравномерно и возможен пробой диодов. А при наличии шунтирующих резисторов обратное напряжение практически делится между диодами поровну. Параллельное соединение диодов с целью получения больших токов нежелательно, так как вследствие разброса параметров и характеристик отдельных экземпляров диодов они будут неодинаково нагружаться током. Для выравнивания токов в этом случае последовательно с отдельными диодами включают уравнильные резисторы, сопротивления которых подбираются опытным путем.

Для трансформаторов выпрямителей первичная обмотка обычно имеет несколько секций, переключаемых на сетевое напряжение 110,

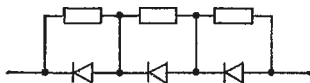


Рис. 120. Последовательное соединение полупроводниковых диодов

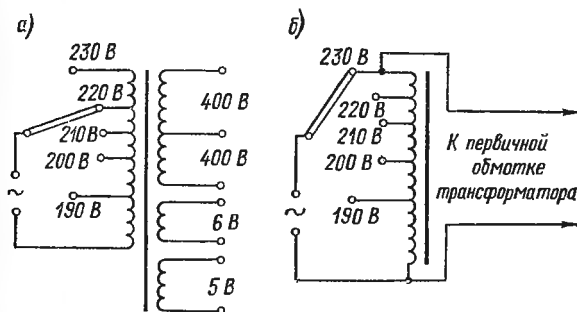


Рис. 121. Способы регулировки напряжения

127 и 220 В. Вторичная обмотка рассчитывается на нужное напряжение. При двухполупериодной схеме она имеет вывод средней точки. Для уменьшения помех от сети в трансформаторах выпрямителей, питающих приемники, между первичной и вторичными обмотками помещают экранирующую обмотку, один конец которой присоединяется к общему минусу.

Дроссели для фильтра, как правило, имеют в сердечнике диамагнитный зазор для устранения магнитного насыщения, вызывающего уменьшение индуктивности. Сопротивление обмотки дросселя постоянному току обычно равно нескольким десяткам или сотням ом. На нем и на повышающей обмотке трансформатора падает часть выпрямленного напряжения.

В цепь сетевой обмотки устанавливают выключатель и предохранитель для автоматического выключения выпрямителя при аварии. Если, например, пробит конденсатор фильтра, то произойдет короткое замыкание цепи выпрямленного тока. Ток в первичной обмотке станет значительно больше нормального и предохранитель расплавится. Без него трансформатор может сгореть. Кроме того, такое короткое замыкание весьма опасно и для диода, который может быть разрушен от перегрева слишком большим током.

Иногда первичную обмотку трансформатора делают с выводами на разные напряжения, например 190, 200, 210, 220 и 230 В, чтобы с помощью переключателя можно было при колебаниях сетевого напряжения поддерживать примерно постоянным напряжение выпрямителя (рис. 121, а). Другой способ регулировки — включение регулировочного автотрансформатора, имеющего выводы на разные напряжения и переключатель.

Включение регулировочного

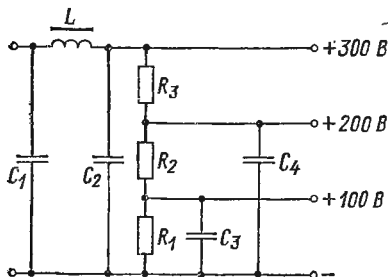


Рис. 122. Делитель напряжения на выходе выпрямителя

Все части выпрямителя, находящиеся под высоким напряжением, должны быть защищены от случайных прикосновений к ним. Никогда не следует касаться частей работающего выпрямителя. Все присоединения к схеме выпрямителя или изменения в ней производятся при выключенном выпрямителе и разряженных конденсаторах фильтра. Полезно в качестве индикатора (указателя) высокого напряжения включить на выпрямленное напряжение неоновую лампу. Ее свечение сигнализирует о наличии высокого напряжения. Неоновая лампа включается через ограничительный резистор сопротивлением в несколько десятков килоом. Наличие постоянной нагрузки в виде такой лампы предохраняет конденсаторы фильтра от пробоя при перенапряжении. Последнее может получиться, если выпрямитель работает вхолостую. При отсутствии нагрузки нет падения напряжения внутри выпрямителя, и поэтому напряжение на конденсаторах фильтра будет максимальным.

Если требуется получить от выпрямителя несколько различных напряжений, то используют делитель напряжения. На рис. 122 показано включение делителя на три различных напряжения. Так как при более низких напряжениях иногда желательно иметь лучшее сглаживание пульсаций, то делитель может играть роль добавочных ячеек фильтра, если включены дополнительные конденсаторы C_3 и C_4 .

автотрансформатора позволяет при понижении сетевого напряжения подводить к первичной обмотке силового трансформатора нормальное напряжение (рис. 121, б). Выпускаются также специальные регулировочные автотрансформаторы для сетевого напряжения 127 и 220 В, позволяющие плавно регулировать напряжение от 0 до 250 В (см. рис. 84).

При работе с выпрямителем, особенно если он дает высокое напряжение, должны соблюдаться меры предосторожности, так как поражение человека напряжением в несколько сот вольт опасно для жизни.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

55. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ОБ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Краткие сведения об измерении тока и напряжения были даны в гл. 1. Существует много различных электроизмерительных приборов, из которых мы рассмотрим наиболее часто применяемые на практике. Ни один измерительный прибор не дает совершенно точных результатов измерения. Разницу между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называют *погрешностью прибора*. Ее принято выражать в процентах по отношению к наибольшему показанию прибора. Например, если с помощью вольтметра на 200 В измерялось напряжение 40 В, а вольтметр показал только 38 В, то погрешность измерения равна 2 В. По отношению к наибольшему показанию прибора (200 В) эта погрешность составляет 1 %, хотя по отношению к измеряемому напряжению она равна 5 %.

В зависимости от погрешности электроизмерительные приборы подразделяются на восемь классов. Каждый класс обозначается значением погрешности, выраженной в процентах. Наиболее точные лабораторные приборы имеют класс 0,05; 0,1; 0,2 или 0,5. Хорошие технические приборы относятся к классу 1 или 1,5. Имеются также и менее точные приборы класса 2,5 или 4,0.

Шкалы приборов могут быть *равномерными*, имеющими по всей длине одинаковые деления, и *неравномерными*, у которых деления сжаты в начале, а иногда и в конце. Измерения в начале шкалы, особенно, если она неравномерная, всегда менее точны.

При измерении надо не ошибаться в отсчете показаний прибора. Для этого следует пользоваться понятием о *цене деления* шкалы. Выясним это на следующем примере. Предположим, что миллиамперметр на 100 мА имеет шкалу на 20 делений. Тогда каждому делению соответствует 5 мА. Это и будет цена деления. Если стрелка такого прибора отклоняется на три деления, то, умножив число делений на цену одного деления, т. е. умножив 3 на 5, получим значение тока 15 мА. При пользовании измерительным прибором всегда следует сначала определить цену деления.

Желая использовать тот или иной прибор, надо сначала внимательно с ним ознакомиться. На шкале прибора, помимо делений с цифрами и букв, обозначающих сокращенно вольты, амперы или другие единицы, имеются еще некоторые условные обозначения, приведенные в табл. 7. Специальным знаком показана система прибора. Например, магнитоэлектрические приборы имеют обозначение в виде подковообразного магнита с катушкой между полюсами; электромагнитные приборы — обозначение в виде катушки с сердечником и т. п. Кроме того, на шкале имеется значок постоянного тока (горизонтальная черточка) или переменного тока (синусоида), а иногда и тот и другой. Приборы постоянного тока нельзя применять для измерений в цепи переменного тока. Но зато некоторые приборы переменного тока можно использовать при измерениях постоянного тока.

Таблица 7

Расшифровка обозначения	Обозначение	Расшифровка обозначения	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор		Постоянный и переменный ток	
Электромагнитный прибор		Вертикальное положение шкалы	
Прибор выпрямительной системы		Горизонтальное положение шкалы	
Термоэлектрический прибор		Изоляция испытана напряжением 2 кВ	
Постоянный ток		Класс точности (например, 1,5)	
Переменный ток		Защита от внешних магнитных полей	

Если стрелка прибора при отсутствии тока не стоит на нуле, то необходимо установить ее на нуль, вращая отверткой *корректор*, расположенный на корпусе прибора (обычно ниже середины шкалы). Корректор связан с подвижной системой прибора и позволяет изменить ее положение в небольших пределах.

Следует обратить внимание на обозначения возле зажимов прибора. Например, у магнитоэлектрических при-

боров всегда отмечены плюс и минус или один из этих знаков. Нужно включать такие приборы с соблюдением полярности, иначе стрелка будет отклоняться в противоположную сторону и может погнуться. Приборы, имеющие несколько пределов измерений, имеют либо несколько зажимов, либо переключатель с обозначениями. Такие приборы включают в строгом соответствии с этими обозначениями. Нельзя, например, к вольтметру, имеющему обозначение 5 В, подключать источник с напряжением 80 В, так как это вызовет повреждение прибора.

Все электроизмерительные приборы требуют осторожного обращения. Их нужно правильно включать, не подвергать толчкам, тряске, не перегружать слишком большими токами или напряжениями. При бережном хранении и правильном использовании приборы могут работать очень долго.

Иногда ошибочно смешивают понятия *чувствительности* и *точности* электроизмерительных приборов, хотя они совершенно не связаны друг с другом. Под чувствительностью понимают способность прибора измерять малые значения тока или напряжения, или какой-либо другой величины. Чем меньше значение измеряемой величины, приходящееся на одно деление шкалы, тем выше чувствительность, а точность прибора тем выше, чем меньше его погрешность. Прибор высокой чувствительности может быть любого класса точности, т. е. не обязательно должен быть очень точным. Малочувствительные приборы также бывают любого класса и могут иметь высокую точность.

56. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ

Рассмотрим более подробно применение амперметров, миллиамперметров и вольтметров.

Как известно, амперметр или миллиамперметр включается в цепь последовательно и через него протекает измеряемый ток. Включение амперметра не должно заметно изменить сопротивление цепи, иначе изменится ток. Поэтому амперметры имеют небольшое сопротивление, обычно равное долям ома, а у миллиамперметров оно не превышает нескольких ом. *Амперметр или миллиамперметр ни в коем случае нельзя подключать непосредственно к источнику тока*, так как вследствие малого сопротивления прибора произойдет короткое замыкание, ток возрастет до недопустимо большого значения и прибор сгорит.

Часто бывает необходимо расширить пределы показаний амперметра или миллиамперметра. Например, амперметром на ток до 1 А нужно измерить ток до 10 А. В таких случаях параллельно амперметру присоединяют шунт (рис. 123), имеющий сопротивление, которое в определенное число раз меньше сопротивления самого амперметра. В данном примере шунт должен пропустить ток 9 А при прохождении через амперметр тока 1 А, т. е. при общем токе 10 А. Тогда ток в амперметре будет в десять раз меньше действительного тока в цепи и можно сказать, что предел показаний амперметра увеличен в десять раз. Чтобы ток

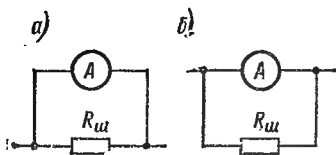


Рис. 123. Правильное (а) и неправильное (б) присоединение шунта к амперметру

шунта был в девять раз больше тока амперметра, необходимо включить шунт с сопротивлением в девять раз меньше, чем сопротивление амперметра.

Расчет сопротивления шунта делают по формуле:

$$R_{ш} = R_a / (n - 1),$$

где R_a — сопротивление амперметра (без шунта); n — число, показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

Если сопротивление шунта должно быть невелико, то в качестве него используют кусок толстой проволоки или металлическую пластинку. Чтобы уменьшить размеры шунта, проволоку или пластинку изгибают зигзагом. Желательно шунт сделать из металла, мало изменяющего сопротивление при изменении температуры, например из манганина. Шунт монтируют внутри самого прибора, либо вне его (наружный шунт).

Поскольку сопротивление шунта обычно значительно меньше, чем у амперметра, то амперметр с шунтом включают в цепь так, чтобы сопротивление проводов, соединяющих шунт с прибором, не прибавлялось к сопротивлению шунта. Влияние этих проводов будет меньше, если их сопротивление добавляется к сопротивлению прибора, а не шунта. На рис. 123, а и б показано правильное и неправильное присоединение шунта.

Расчет сопротивления шунта не может быть очень точным, и изготовленный шунт никогда не имеет сопротивления, точно равного рассчитанному. Поэтому практически «подгоняют» сопротивление шунта опытным путем.

Для этого шунт из проволоки делают с несколько большим сопротивлением, чем требуется, и постепенно уменьшают длину проволоки. Шунт в виде пластинки, наоборот, делают с несколько меньшим сопротивлением, чем нужно, а затем постепенно увеличивают сопротивление, уменьшая ширину пластинки (подпиливая или подрезая ее).

Удобный способ подгонки шунта состоит в том, что его берут с несколько большим сопротивлением, но последовательно с прибором также включают проволочку, увеличивающую сопротивление этой ветви (рис. 124). В процессе подгонки эту проволочку постепенно укорачивают. Подгонка шунта для получения нужного предела производится по эталонному амперметру, в качестве которого

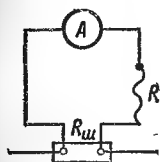


Рис. 124. Включение дополнительного резистора R для подгонки шкалы амперметра с шунтом

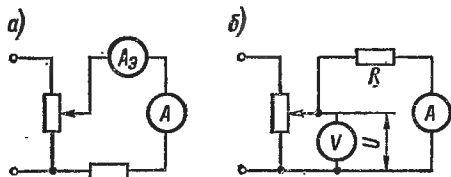


Рис. 125. Схемы градуировки приборов для измерения тока

практически можно использовать любой амперметр не слишком низкого класса точности.

Каждый амперметр можно сделать универсальным и измерять им токи разного значения, если иметь несколько различных шунтов. Нужно помнить, что шунты позволяют лишь увеличивать предел показаний. Уменьшить этот предел, т. е. заставить амперметр быть более чувствительным и давать большее отклонение при меньшем токе, невозможно без переделки прибора.

Для градуировки или проверки градуировки приборов, измеряющих ток, применяются две основные схемы. В схеме рис. 125, а эталонный прибор $A_э$ для измерения тока включен последовательно с градуируемым прибором A и дополнительным резистором, ограничивающим ток. В схеме рис. 125, б используется эталонный вольтметр и последовательно с прибором A включен резистор с известным сопротивлением R , которое во много раз больше,

чем сопротивление прибора A . Если сопротивление резистора R сравнительно невелико, то лучше вольтметр присоединить параллельно к нему. Установка для градуировки обычно питается через потенциометр, которым регулируется ток, протекающий через прибор. Устанавливая по эталонному прибору различные значения тока в приборе A , записывают его показания (число делений) в виде таблицы, по которой затем на шкалу наносят градуировку.

Для измерения напряжения между двумя точками цепи к этим точкам подключается вольтметр. Иначе говоря, вольтметр включают параллельно участку цепи, на котором нужно измерить напряжение. Включение вольтметра не должно заметно изменять режим цепи, т. е. ток в цепи при включении вольтметра не должен заметно увеличиваться. Поэтому вольтметр всегда имеет высокое сопротивление. Чем больше сопротивление вольтметра, тем он лучше.

Следует заметить, что при измерении ЭДС источника вольтметр включается последовательно (см. рис. 12, б). И в этом случае для более точного измерения ЭДС необходимо, чтобы вольтметр имел большое сопротивление. Оно должно во много раз превышать внутреннее сопротивление источника. Если это не соблюдается, то значительная часть ЭДС будет теряться на внутреннем сопротивлении источника и вольтметр измерит напряжение на зажимах источника заметно меньшее, чем ЭДС.

У большинства вольтметров сопротивление составляет тысячи и десятки тысяч ом. Когда источник ЭДС имеет большое внутреннее сопротивление или внешнее сопротивление цепи велико, вольтметр с сопротивлением даже в тысячи или десятки тысяч ом может оказаться непригодным. О качестве вольтметра следует судить по его сопротивлению, приходящемуся на один вольт шкалы. Сопротивление хорошего вольтметра для измерений в радиоэлектронной аппаратуре должно быть не ниже 10 000 Ом на каждый вольт шкалы.

Влияние сопротивления вольтметра на результат измерения показывает следующий пример. Пусть напряжение 300 В подводится к двум последовательно включенным резисторам по 20 кОм (рис. 126). Тогда на каждом из них напряжение равно 150 В. Попробуем проверить его с помощью вольтметра, имеющего сопротивление 100 Ом на вольт. Если вольтметр включен на шкалу 200 В, то его сопротивление будет $200 \cdot 100 = 20\,000\text{ Ом} = 20\text{ кОм}$.

После включения такого вольтметра параллельно одному из резисторов общее сопротивление данного участка уменьшится и будет равно $20 : 2 = 10$ кОм. Теперь на этом участке напряжение составит не $1/2$, а $1/3$ всего напряжения, т. е. будет равно 100 В. Такое напряжение покажет вольтметр вместо 150 В, бывших до его подключения. Измерение с подобным результатом нельзя считать удовлетворительным. При этом следует ясно представлять себе, что сам вольтметр может быть высокого класса точности. Неправильное измерение в данном случае получается не потому, что вольтметр дает большую погрешность. Все дело в том, что вольтметр имеет слишком малое сопротивление и после его присоединения напряжения на участ-

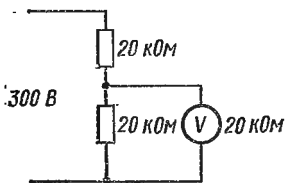


Рис. 126. Включение вольтметра для измерения напряжения

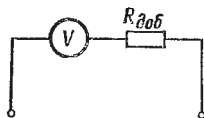


Рис. 127. Добавочный резистор к вольтметру

ках цепи перераспределяются, т. е. становятся иными, нежели до включения вольтметра.

Но если в рассматриваемом примере вольтметр имеет сопротивление 10 кОм на вольт, то при шкале 200 В его сопротивление равно 2 МОм. Параллельное включение такого вольтметра к резистору с сопротивлением 20 кОм вызовет уменьшение сопротивления данного участка лишь на 1 % и вольтметр покажет напряжение незначительно меньше 150 В, т. е. результат измерения будет вполне удовлетворительным.

Часто необходимо расширить пределы диапазона измерений вольтметра, чтобы измерять более высокие напряжения, чем те, на которые он рассчитан. Это делают с помощью добавочных резисторов, включаемых последовательно с вольтметром (рис. 127). Пусть, например, вольтметр на 30 В нужно применить для измерения напряжений до 300 В, т. е. увеличить предел диапазона измерений в десять раз. В этом случае добавочный резистор должен быть таким, чтобы из всего напряжения 300 В на вольтметр приходи-

лось 30 В, а остальные 270 В терялись в добавочном резисторе. Так как 270 В в девять раз больше, чем 30 В, то сопротивление добавочного резистора должно быть в девять раз больше сопротивления вольтметра.

Расчет сопротивления добавочного резистора производят по формуле

$$R_{\text{доб}} = (n - 1) R_{\text{в}},$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление вольтметра (без добавочного резистора); n — число, показывающее, во сколько раз необходимо увеличить предел измерений. Чтобы добавочный резистор не перегревался, он должен быть рассчитан на ток, который через него проходит, или на мощность, рассеивающуюся в нем. Применяя различные добавочные резисторы, вольтметр можно использовать для измерения нескольких различных напряжений (рис. 128). Обычно такие добавочные резисторы

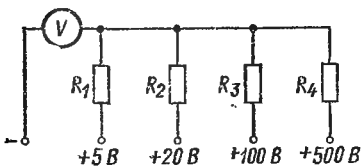


Рис. 128. Вольтметр, рассчитанный на несколько диапазонов измерений иапряжения

изготавливают из тонкой реостатной проволоки. В простейшем случае используют и непроволочные резисторы.

Добавочные резисторы монтируют внутри прибора или вне его (наружные добавочные резисторы).

Необходимо иметь в виду, что в устройстве вольтметра и миллиамперметра нет принципиальной разницы. Каждый миллиамперметр можно превратить в вольтметр, если подключить к нему последовательно добавочный резистор. При этом желательно, чтобы миллиамперметр был рассчитан на возможно меньший ток. Тогда вольтметр получится с бóльшим сопротивлением. Таким образом, миллиамперметр или микроамперметр с шунтами и добавочными резисторами может служить универсальным вольтмиллиамперметром для измерения различных токов и напряжений.

На рис. 128 показана схема высокоомного вольтметра для постоянного напряжения, состоящего из микроамперметра и нескольких добавочных резисторов. Если взять микроамперметр на 100 мкА или 0,1 мА, а вольтметр рассчитывается на шкалы 5, 20, 100 и 500 В, то значения сопротивлений должны быть $R_1 = 5 : 0,1 = 50$ кОм; $R_2 = 200$ кОм; $R_3 = 1$ МОм и $R_4 = 5$ МОм.

Для градуировки и проверки градуировки вольтметров, измеряющих постоянные или переменные напряжения, чаще всего пользуются схемой рис. 129, а, в которой эталонный вольтметр V_3 и градуируемый V соединены параллельно, а напряжение регулируется потенциометром. Если нужно произвести градуировку на низкое напряжение, а источник, например выпрямитель или сеть, дает большое напряжение, то потенциометр подключают к источнику через добавочный понижающий резистор или через понижающий трансформатор.

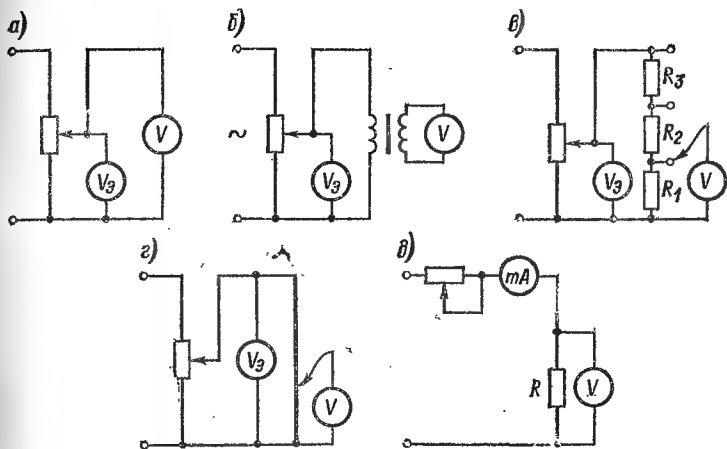


Рис. 129. Схемы для градуировки вольтметров

Иногда эталонный вольтметр рассчитан на более низкие или более высокие напряжения, чем нужно для градуировки. В этом случае между вольтметрами включают понижающий или повышающий трансформатор с известным коэффициентом трансформации или делитель напряжения, который делит напряжение в известное число раз (рис. 129, б и в). При этом надо, чтобы сопротивление участка делителя, параллельно которому присоединен вольтметр (R_1 на рис. 129, в), было во много раз меньше сопротивления вольтметра, т. е. чтобы шунтирующее влияние вольтметра было незначительным. Для вольтметра, присоединенного ко всему делителю, этого не требуется. Например, эталонный вольтметр V_3 , на рис. 129, в может иметь малое сопротивление.

Специально для градуировки вольтметров на доли вольта применяют схему, представленную на рис. 129, з, в которой напряжение подается на тонкий высокоомный проводник длиной 1 м, а градуируемый вольтметр присоединяется к различным участкам этого проводника. На каждый 1 см длины последнего приходится 0,01 доля напряжения, измеряемого эталонным вольтметром.

Иногда в качестве эталонного прибора применяют амперметр или миллиамперметр. Ток, измеряемый этим прибором, пропускают через резистор с известным сопротивлением R (рис. 129, д), на котором получается известное напряжение. Параллельно R присоединяется градуируемый вольтметр. Значение тока регулируется реостатом или потенциометром. Если напряжение нужно снизить, то между резистором R и вольтметром включают делитель.

57. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Наиболее распространенными системами электроизмерительных приборов являются *магнитоэлектрическая, электромагнитная, термоэлектрическая и выпрямительная*.

Магнитоэлектрические приборы являются наиболее чувствительными и могут быть рассчитаны на очень малые токи и напряжения. Весьма распространены магнитоэлектрические миллиамперметры и микроамперметры. Чувствительные магнитоэлектрические приборы, не имеющие шкалы, градуированной на микроамперы или миллиамперы, называют гальванометрами. Существуют гальванометры, измеряющие токи около 10^{-11} А и даже меньше.

Работа магнитоэлектрических приборов основана на взаимодействии магнитного поля и проводника с током. В этих приборах между полюсами сильного постоянного магнита укреплен на двух полуосях легкая рамка с обмоткой из тонкой проволоки (рис. 130). Ток к рамке подводится с помощью двух спиральных пружинок (волосков). Для усиления магнитного поля внутри рамки помещен цилиндр из мягкой стали и, следовательно, рамка может вращаться в воздушном промежутке между этим цилиндром и полюсными наконечниками магнита. Чтобы уравновесить подвижную систему, к рамке прикреплены стерженьки с грузиками, показанные на рис. 130. Они главным образом и являются противовесом для стрелки. Когда через обмотку рамки проходит ток, то поле магнита дей-

ствуется на проводники рамки и поворачивает ее. Чем больше ток, тем больше поворачивается рамка, преодолевая противодействие пружинок.

Возможность устройства магнитоэлектрических приборов высокой чувствительности объясняется тем, что с помощью постоянного магнита создается очень сильное магнитное поле, а в обмотке рамки имеется много витков. Поэтому даже при слабых токах возникает сила взаимодействия, достаточная для поворота рамки. Угол отклонения α подвижной системы магнитоэлектрического прибора пропорционален току в рамке:

$$\alpha = kI.$$

Здесь k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Он учитывает силу магнита, форму рамки и число витков в ней, упругость пружинок и т. д. Ток в обмотке рамки создает магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита. В результате возникает *вращающий момент*, стремящийся повернуть рамку. Пружинки (волоски) своей упругостью противодействуют этому, т. е. создают *противодействующий момент*. Поворот подвижной системы происходит до тех пор, пока вращающий момент не станет равен противодействующему.

Если изменить направление тока, то рамка будет вращаться в противоположную сторону. При переменном токе рамка должна с частотой этого тока поворачиваться то в одну сторону, то в другую. Вследствие того что подвижная система обладает значительной инерцией, она может делать такое колебание только при частоте порядка единиц герц, а при частотах в десятки герц и выше рамка будет стоять на месте. Иногда бывает заметно лишь небольшое дрожание стрелки около нуля. В цепи пульсирующего тока магнитоэлектрический прибор показывает одну постоянную составляющую.

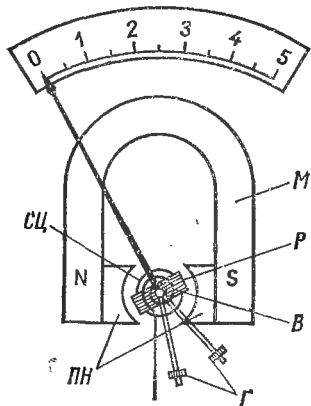


Рис. 130. Принцип устройства прибора магнитоэлектрической системы

М — магнит; Р — рамка; В — волосок; ПН — полусферические наконечники; Г — грузики; СЦ — стальной цилиндр

Таким образом, магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения постоянного тока. Шкала этих приборов равномерна, т. е. все деления на ней одинаковы. Так как рамка должна быть легкой, то наматывать на нее толстый провод нельзя. Поэтому без шунтов магнитоэлектрические приборы могут пропускать ток не более единиц или десятков миллиампер. Нельзя также наматывать на рамку очень много проволоки, чтобы создать

большое сопротивление, необходимое для вольтметра. Вследствие этого магнитоэлектрические вольтметры всегда имеют добавочные резисторы.

Желательно, чтобы стрелка после отклонения устанавливалась сразу и не совершала колебания. Для успокоения подвижной системы в магнитоэлектрических приборах рамка делается из алюминия и является короткозамкнутым витком. При вращении рамки в магнитном поле в ней индуцируется ток, который создает свое магнитное поле. В результате взаимодействия этих двух полей возникает торможение рамки и она быстро останавливается.

Недостатком магнитоэлектрических приборов является легкий выход их из строя при перегрузке. Обычно при чрезмерно большом токе перегорает один из волосков.

Магнитоэлектрические приборы, по сравнению с другими приборами, являются одними из наиболее точных.

Электромагнитные приборы (рис. 131) относятся к числу наиболее простых. В этих приборах ток проходит по катушке и создает магнитное поле, стремящееся втянуть внутрь катушки сердечник в виде пластинки из мягкой стали, укрепленный на оси со стрелкой. Чем больше ток, тем сильнее втягивается сердечник и тем больше отклоняется стрелка. В нулевом положении подвижная система удерживается спиральной пружинкой.

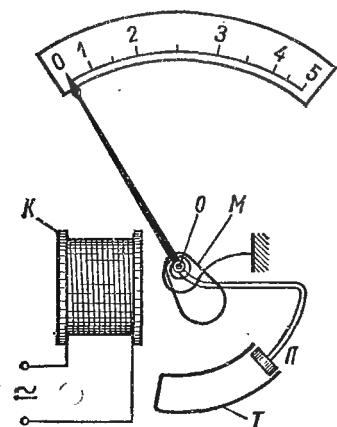


Рис. 131. Принцип устройства прибора электромагнитной системы

К — катушка; О — ось; М — мягкая сталь; П — поршень, Т — трубка

Чтобы стрелка после отклонения не колебалась, в приборе обычно применяется воздушный успокоитель (демпфер). Он состоит из трубки, в которой движется поршень, соединенный с подвижной системой. Между поршнем и стенками трубки имеется воздушный зазор. Воздух сопротивляется движению поршня и успокаивает подвижную систему.

Шкала электромагнитных приборов неравномерна. В начале шкалы деления очень мелкие, затем они увеличиваются. В первом приближении угол отклонения α подвижной системы электромагнитного прибора пропорционален квадрату тока:

$$\alpha = kI^2.$$

Действительно, если увеличить ток в катушке в два раза, то в два раза усилится магнитное поле катушки. Под влиянием этого поля в два раза усилится и намагничивание сердечника, втягивающегося в катушку. Но если в два раза усилилось и поле катушки, и поле сердечника, то взаимодействие между ними усилится в четыре раза. Подбором формы сердечника можно в значительной степени изменить характер зависимости между углом отклонения и током, приблизив шкалу к равномерной.

Втягивание сердечника в катушку не зависит от направления тока. Поэтому электромагнитные приборы не имеют полярности и пригодны для постоянного и переменного токов. Приведенная формула для угла отклонения α подтверждает сказанное. Угол α имеет знак плюс при токе любого направления, т. е. любого знака, так как $I^2 = (-I)^2$. Электромагнитные приборы для переменного тока градуируются всегда на действующее значение. Для постоянного тока шкала у них почти не изменяется.

В случае пульсирующего тока электромагнитный прибор показывает действующее значение этого тока I_n , которое, как мы знаем, равно геометрической сумме постоянной составляющей I_0 и действующего значения переменной составляющей I :

$$I_n = \sqrt{I_0^2 + I^2}.$$

Иногда встречаются поляризованные электромагнитные приборы, имеющие дополнительный постоянный магнит и пригодные только для постоянного тока. Примером

таких приборов могут служить школьные вольтметры и амперметры старого типа (эти приборы являются неудачными).

У электромагнитных амперметров обмотка состоит из небольшого числа витков толстого провода, и поэтому для измерения большого тока эти приборы делаются без шунтов. У вольтметров электромагнитной системы на катушке намотано большое число витков тонкого провода и, кроме того, обычно включен добавочный резистор. Электромагнитные приборы обладают небольшой чувствительностью и их не изготовляют для измерения малых токов или напряжений. Вольтметры электромагнитной системы потребляют сравнительно большой ток (обычно десятки миллиампер) и являются низкоомными. Достоинством электромагнитных приборов является то, что они могут выдерживать кратковременные большие перегрузки. Это объясняется тем, что в них ток не проходит через тонкие пружинки. Приборы электромагнитной системы применяются при измерениях в цепях сетевого переменного тока с частотой 50 Гц и постоянного тока.

В отличие от магнитоэлектрических приборов у электромагнитных приборов показания зависят от влияния внешних магнитных полей. Уменьшение этого влияния достигается применением экранов, а также специальных *астатических приборов*. Они имеют две катушки со втягивающимися сердечниками, укрепленными на одной оси. Магнитные поля катушек направлены в пространстве в противоположные стороны и поэтому влияния внешнего поля на поля этих катушек взаимно компенсируются.

Термоэлектрические приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического прибора с *термопреобразователем*, который в свою очередь состоит из одного или нескольких *термоэлементов*, иначе называемых *термопарами*.

В каждом термоэлементе имеются две проволоочки из различных металлов, спаянные одним концом друг с другом. Если место спая нагреть, то в термоэлементе образуется ЭДС, составляющая малые доли вольта. Одна проволоочка будет иметь положительный потенциал, другая — отрицательный. Магнитоэлектрический прибор, подключенный к термоэлементу, покажет прохождение постоянного тока. Чем выше температура нагрева спая термоэлемента, тем большая ЭДС возникает в нем и тем сильнее ток в магнитоэлектрическом приборе.

Термоэлектрические приборы используются только для переменного тока. Хотя нагрев термоэлемента может осуществляться и постоянным током, но это нецелесообразно, так как для постоянного тока следует непосредственно применять магнитоэлектрические приборы. Измеряемый переменный ток проходит через проволочки термоэлемента или через другую проволочку, называемую *подогревателем* и расположенную около спая (рис. 132). Таким образом, в термопреобразователе происходит превращение энергии измеряемого переменного тока в энергию постоянного тока, приводящего в действие магнитоэлектрический прибор.

Шкала термоэлектрических приборов неравномерна и приблизительно квадратична. Это объясняется тем, что ток в магнитоэлектрическом приборе пропорционален возникающей в термоэлементе ЭДС, которая пропорциональна температуре спая. А температура зависит от количества выделяющейся теплоты, пропорциональной квадрату тока. Таким образом, для угла отклонения получаем зависимость:

$$\alpha = kI^2.$$

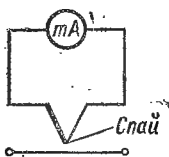


Рис. 132. Принцип устройства прибора термоэлектрической системы

Приборы термоэлектрической системы применяются, как правило, только в качестве измерителей тока. Они могут иметь высокую чувствительность и удобны тем, что в случае необходимости сам измеряющий прибор можно удалить на некоторое расстояние от термопреобразователя, соединив их друг с другом проводами. У термоприборов нередко применяются шунты для расширения предела измерений. Перегрузка для приборов этого типа весьма опасна, так как термопара или подогреватель могут при увеличении тока легко перегореть.

Приборы *выпрямительной* (или *детекторной*) системы представляют собой магнитоэлектрические приборы с дополнительными выпрямителями и служат для измерений переменных токов и напряжений. В качестве выпрямителей используются полупроводниковые диоды. Принцип работы выпрямительных приборов состоит в том, что переменный ток преобразуется с помощью выпрямителей в пульсирующий ток и его постоянная составляющая измеряется магнитоэлектрическим прибором. Чем больше значение

переменного тока, тем больше и постоянная составляющая выпрямленного тока.

При измерении тока схема выпрямительного прибора должна быть такова, чтобы через нее проходили обе полу-волны переменного тока, тогда включение прибора не будет нарушать режима работы той цепи, в которой нужно измерить ток. Схема выпрямления с одним диодом может применяться лишь в случае, когда почти весь ток пропускается через шунт (рис. 133, а). В схеме рис. 133, б обратные полуволны пропускаются через диод $D2$, последовательно с которым включен резистор R с сопротивлением, равным сопротивлению прибора.

Для повышения чувствительности применяют выпрямление двух полуволн по мостовой схеме с четырьмя дио-

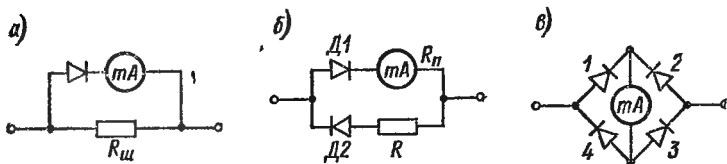


Рис. 133. Схемы приборов выпрямительной (детекторной) системы для измерения тока

дами (рис. 133, в). Эта схема является наиболее распространенной. В ней одна полуволна тока проходит через диод 1, измерительный прибор и диод 3, а другая полу-волна — через диод 2, прибор и диод 4.

Возможность измерения малых токов является главным достоинством выпрямительных приборов. Их чувствительность для переменного тока по сравнению с чувствительностью примененного магнитоэлектрического прибора примерно в 2,5—3 раза меньше для однополупериодной схемы и всего лишь на 20—30 % меньше для двух-полупериодной. Например, если взять магнитоэлектрический прибор со шкалой на 1 мА, то по схеме рис. 133, б, получится шкала для переменного тока примерно на 2,5—3 мА, а по схеме рис. 133, в — на 1,25—1,5 мА. Для расширения шкалы применяют шунты, их следует присоединять к зажимам, к которым подводится измеряемый переменный ток.

Выпрямительные приборы имеют ряд недостатков. Они обладают большим сопротивлением, и поэтому на них получается падение напряжения порядка десятых долей вольта

и более. Шкала выпрямительных приборов на значительном протяжении почти равномерна, но все же вначале она немного сжата из-за нелинейности вольтамперной характеристики полупроводниковых диодов. Выпрямляющие свойства диодов, а значит и показания прибора зависят от температуры и частоты. Плоскостные диоды имеют значительную емкость, поэтому для измерения токов более высоких частот надо применять точечные диоды.

Показания выпрямительных приборов зависят от формы кривой тока. Градуировка обычно производится на переменном токе синусоидальной формы, и поэтому измерение несинусоидальных токов происходит с ошибкой. Следует также отметить, что выпрямляющие свойства некоторых

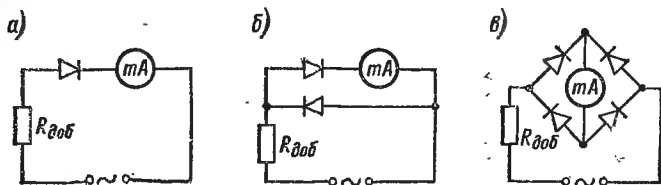


Рис. 134. Схемы вольтметров выпрямительной системы

диодов с течением времени изменяются, и это приводит к понижению точности показаний приборов.

Вольтметры выпрямительной системы имеют схемы, подобные приведенным на рис. 133, но в цепь переменного тока у них включаются добавочные резисторы. Простейшая схема вольтметра с одним диодом (рис. 134, а) применяется только для таких напряжений, которые допустимы для диода данного типа. Чтобы диод не был пробит, при увеличении измеряемого напряжения надо включать последовательно несколько диодов, но тогда более выгодно применять схему по рис. 134, б, в которой обратная полуволна тока пропускается через другой диод. Кроме того, в схеме по рис. 134, а постоянная составляющая тока должна замыкаться через цепь, в которой измеряется напряжение, что не всегда возможно.

Наилучшей является мостовая схема, приведенная на рис. 134, в. Она не требует последовательного включения диодов при более высоких напряжениях, так как в ней пропускаются обе полуволны переменного тока. Поэтому почти все напряжение падает на добавочном резисторе как при положительной, так и при отрицательной полуволне измеряемого напряжения.

Для повышения сопротивления вольтметра следует применять возможно более чувствительный микроамперметр. При мостовой схеме и гальванометре на 100 мкА вольтметр будет иметь сопротивление около $6 \div 8$ кОм на вольт. Диоды желательно иметь с возможно меньшей собственной емкостью. Расчет сопротивлений добавочных резисторов $R_{доб}$ делают так же, как и для постоянных напряжений, но полученные значения делят на 2,5—3 для однополупериодной схемы и на 1,25—1,5 для двухполупериодной схемы. Такой расчет является приближенным, и при градуировке $R_{доб}$ подгоняют опытным путем.

Пример. Рассчитать $R_{доб}$ на шкалу 150 В для вольтметра по мостовой схеме с микроамперметром на 200 мкА.

Решение. Определяем сопротивление добавочного резистора при постоянном напряжении $R = 150 : 0,2 = 750$ кОм. Затем делим его значение на 1,5 и окончательно получаем $R_{доб} = 750 : 1,5 = 500$ кОм = 0,5 МОм.

58. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Приборы *электродинамической* системы являются одними из наиболее точных и используются в качестве лабораторных или эталонных приборов. Они имеют систему

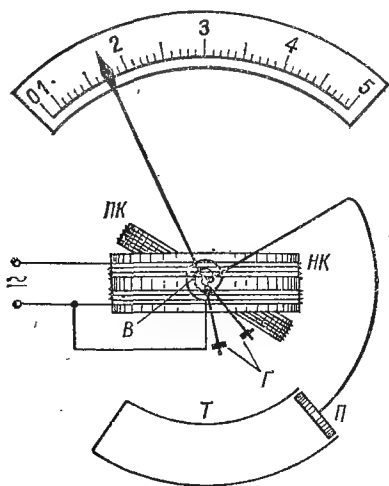


Рис. 135. Принцип устройства прибора электродинамической системы

из двух катушек (рис. 135): неподвижной (НК) и подвижной (ПК), которая вращается внутри неподвижной катушки. Ток к подвижной катушке подводится через спиральные пружинки (волоски B). К подвижной катушке прикреплены стрелка, уравнивающие грузики Γ и поршень Π воздушного успокоителя, который может двигаться в трубке T .

Когда по катушкам проходит ток, вокруг них возникают магнитные поля. Взаимодействие этих полей создает вращающий момент. Подвижная катушка поворачивается до такого положения, в котором противодействующий момент, создаваемый пружинками, уравнивает момент вращения. Так как поле катушек тем сильнее, чем больше ток, то угол отклонения стрелки α пропор-

ционален токам i_1 и i_2 в катушках:

$$\alpha = ki_1i_2,$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции катушек и упругости пружинок.

Катушки электродинамических амперметров соединяют последовательно или параллельно. В любом из этих случаев ток в каждой катушке пропорционален измеряемому току i в той цепи, в которую включен прибор. Следовательно, для амперметра получаем

$$\alpha = ki^2.$$

Катушки электродинамических вольтметров соединяют последовательно и включают к ним добавочный резистор. Ток в катушках i пропорционален напряжению u , поэтому для вольтметра

$$\alpha = ku^2.$$

Таким образом, шкала у электродинамических приборов квадратичная. Эти приборы могут работать на постоянном и переменном токе. При изменении направления тока одновременно в обеих катушках направление силы взаимодействия не изменится. Приведенные выше формулы подтверждают это. Если заменить ток i на $-i$, то угол отклонения останется положительным, так как $i^2 = (-i)^2$. При переменном токе стрелка электродинамического прибора отклоняется на величину, пропорциональную действующему значению тока или напряжения. Недостатками этих приборов являются сравнительно малая чувствительность, большое потребление мощности, а также зависимость показаний от влияния внешних магнитных полей. Для уменьшения этого влияния применяют экранирование.

Электродинамическая система используется в ваттметрах постоянного или переменного тока. В таких ваттметрах одна катушка с небольшим числом витков толстого провода, называемая токовой, включается в цепь последовательно. Вторая катушка с большим числом витков тонкой проволоки, называемая катушкой напряжения, включается вместе с добавочным резистором параллельно источнику (рис. 136). В первой катушке протекает ток нагрузки I , а ток второй катушки пропорционален напряжению U . Следовательно, отклонение стрелки пропорционально произведению IU , т. е. мощности P :

$$\alpha = kIU = kP.$$

Ваттметр имеет равномерную шкалу. Чтобы стрелка отклонялась вправо от нуля, необходимо правильно включить катушки. Обычно один из концов токовой катушки отмечен звездочкой. Его называют генераторным концом и присоединяют к источнику. Этим же знаком отмечен конец катушки напряжения, соединяемый с токовой катушкой (рис. 136).

В цепи переменного тока электродинамический ваттметр измеряет только активную мощность. Если нагрузка имеет чисто реактивное сопротивление, то сдвиг фаз между током и напряжением составляет 90° . Такой же сдвиг будет между токами в катушках ваттметра. Тогда в течение одной четверти периода направления этих токов совпадают и подвижная система стремится отклониться в одну сторону, но в течение следующей четверти периода направление одного из токов изме-

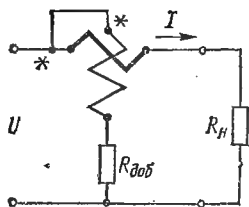


Рис. 136. Схема включения электродинамического ваттметра

нится и система должна отклониться в обратную сторону. В результате отклонения вообще не будет.

С помощью ваттметра можно определить $\cos \varphi$ нагрузки. Для этого измеряют активную мощность P , а затем, измерив вольтметром напряжение U и амперметром ток I , находят полную мощность $S = UI$, и тогда $\cos \varphi = P/S$.

Индукционные приборы предназначены только для переменного тока и применяются главным образом в качестве счетчиков электро-энергии. Работа этих приборов основана на взаимодействии вращающегося (бегущего) магнитного поля с диамагнитным металлическим диском, укрепленным на оси. Бегущее магнитное поле увлекает за собой диск, который вращается вслед за полем. Это явление можно наблюдать на опыте (рис. 137). Если вращать постоянный магнит M , то алюминиевый диск D , который пронизывается магнитным полем, также приходит во вращение. Это можно объяснить так,

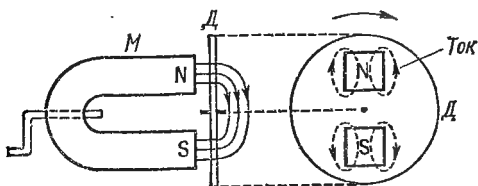


Рис. 137. Взаимодействие вращающегося магнитного поля и алюминиевого диска

Магнитный поток вращающегося магнита пересекает диск и создает в нем индукционные токи, показанные на рис. 137 штриховыми линиями. По закону Ленца эти токи своим магнитным полем стремятся противодействовать вращению магнита, т. е. задержать его. Индукционные токи создают в том месте, куда приближается магнит, одноименный магнитный полюс, который отталкивается от магнита, а в том месте диска, от которого удаляется магнит, разноименный полюс, который притягивается к магниту. В результате диск вращается за магнитом.

Скорость вращения диска всегда меньше скорости вращения магнита. Если предположить, что эти скорости равны, то не будет происходить пересечения диска магнитными силовыми линиями и в диске не возникнут индукционные токи.

В широко распространенных индукционных счетчиках электро-энергии также происходит вращение диска под влиянием магнитного поля, которое перемещается все время в одном направлении вдоль некоторой части диска. Бегущее магнитное поле создается за счет фазового сдвига между двумя магнитными потоками.

На рис. 138 показано устройство и принцип работы индукционного счетчика при активной нагрузке. Диск D , который может легко вращаться, пронизывается в точках A , B и V магнитными потоками Φ_1 и Φ_2 , сдвинутыми по фазе на 90° . Поток Φ_1 , пронизывающий диск в местах A и B , создается электромагнитом $\mathcal{E}M_1$, имеющим обмотку с небольшим числом витков толстого провода, включенную последовательно в цепь. Через нее проходит ток нагрузки I . Поэтому поток Φ_1 пропорционален этому току. Электромагнит $\mathcal{E}M_2$ имеет обмотку с большим числом витков тонкой проволоки, включенную параллельно.

Ток электромагнита $\mathcal{M}_2$, а следовательно, и его магнитный поток Φ пропорциональны напряжению U . Схема включения счетчика напоминает схему включения ваттметра (рис. 136), нет только добавочного резистора у катушки напряжения.

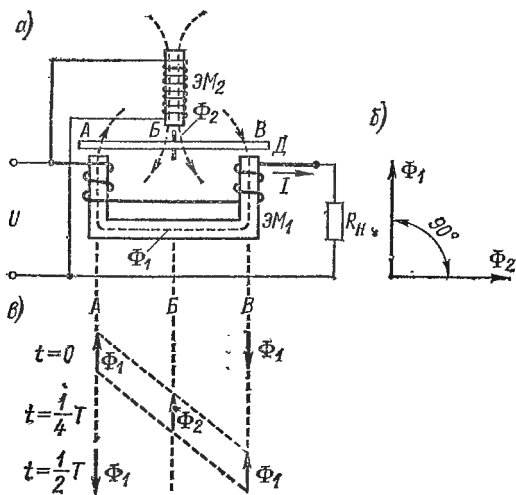


Рис. 138. Устройство и принцип работы электросчетчика индукционной системы

Вследствие большой индуктивности обмотки электромагнита $\mathcal{M}_2$ ток в ней отстает от напряжения на угол, близкий к 90° . Такой же фазовый сдвиг будет между потоками Φ_1 и Φ_2 (рис. 138, б). В соответствии с этим на рис. 138, в изображены в виде векторов для различных моментов времени потоки Φ_1 и Φ_2 . Как видно, в течение одного полупериода вдоль участка AB пробегает магнитное поле, увлекающее за собой диск. В течение следующего полупериода вдоль того же участка в ту же сторону пробегает магнитное поле обратного направления. Оно продолжает увлекать диск в прежнем направлении.

Такой индукционный счетчик учитывает только активную энергию. Если нагрузка имеет, например, чисто индуктивное сопротивление, то ток в цепи отстает по фазе от напряжения на 90° . В электромагните $\mathcal{M}_2$ всегда создается такой же фазовый сдвиг. Поэтому сдвиг фаз между токами обоих электромагнитов будет равен нулю. Не будет фазового сдвига между потоками Φ_1 и Φ_2 . Бегущее магнитное поле не возникает.

При чисто емкостной нагрузке фазовый сдвиг между Φ_1 и Φ_2 составит 180° , и в этом случае бегущее магнитное поле также не возникнет.

Чем больше ток и напряжение, тем сильнее токи в обмотках электромагнитов, тем сильнее их магнитные потоки и тем больше скорость вращения диска. Число оборотов диска n пропорционально мощности P и времени t , в течение которого протекает ток, т. е. пропорционально

работе тока или расходу электроэнергии

$$n = kPt,$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции счетчика, в частности от того, как тормозится диск при вращении. Обычно торможение осуществляется индукционным способом. Диск проходит между полюсами постоянного магнита. За счет этого в диске индуцируются токи, которые взаимодействуют своим полем с полем постоянного магнита и создают тормозящий эффект. Счетный механизм, соединенный с диском, показывает число киловатт-часов или гектоватт-часов электроэнергии, переданной в нагрузку.

59. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Наиболее удобно измерять сопротивления с помощью *омметров*, у которых стрелка показывает на шкале измеряемое сопротивление в омах.

Омметр представляет собой магнитоэлектрический миллиамперметр или микроамперметр с добавочным резисто-

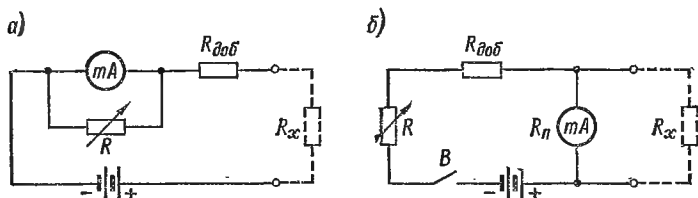


Рис. 139. Схемы омметров с последовательным (а) и параллельным (б) включением измеряемого резистора

ром и батареей. Резистор с измеряемым сопротивлением R_x обычно включается последовательно в цепь омметра (рис. 139, а). Когда этот резистор не включен, то цепь разомкнута. Тогда ток через прибор не проходит и стрелка омметра находится в крайнем левом положении; это положение обозначено на шкале символом бесконечно большого сопротивления (∞). Если зажимы для измеряемого сопротивления замкнуть накоротко, то стрелка омметра должна отклониться в крайнее правое положение, которое на шкале отмечено нулем, так как оно соответствует измеряемому сопротивлению, равному нулю.

Таким образом, у омметра нуль на шкале справа. Для различных измеряемых сопротивлений стрелка занимает промежуточные положения. Шкала имеет деления непо-

средственно в омах. Она всегда неравномерная, сжатая в области больших сопротивлений.

При пользовании омметром сначала устанавливают стрелку на бесконечность с помощью корректора при выключенном резисторе с измеряемым сопротивлением. После этого замыкают накоротко зажимы измеряемого резистора и вращением ручки переменного резистора устанавливают стрелку на нуль. Сопротивление R обычно в 10—20 раз больше сопротивления самого миллиамперметра и играет роль шунта. Изменяя R , можно изменять ток в миллиамперметре. Предварительная установка на нуль необходима потому, что с течением времени напряжение батарейки омметра понижается. Если установить стрелку на нуль не удастся, то это показывает, что батарейка разрядилась. Измерения с достаточной точностью получаются при R_x в пределах от $0,1R_{\text{доб}}$ до $10 R_{\text{доб}}$. Для измерения больших сопротивлений необходимо применить источник с более высоким напряжением и включить $R_{\text{доб}}$ большего значения. Такой источник иногда подключается к омметру снаружи, в то время как батарейка для измерения не очень больших сопротивлений обычно расположена внутри прибора.

Измерение малых сопротивлений удобно производить по схеме параллельного омметра (рис. 139, б), в которой R_x присоединяется параллельно миллиамперметру, а сопротивление $R_{\text{доб}}$ значительно больше сопротивления самого прибора $R_{\text{п}}$. Для установки на бесконечность (при разомкнутых зажимах R_x) служит переменный резистор R . В этом омметре шкала имеет нуль слева, а бесконечность справа. Пределы измеряемых сопротивлений — примерно $(0,1 \div 10) R_{\text{п}}$. Специальные омметры для измерения очень больших сопротивлений называются *мегомметрами*. Источником тока в них иногда бывает индуктор, т. е. магнитоэлектрическая машина, вращаемая с помощью ручки и дающая напряжение $100 \div 200$ В или выше.

Очень большие сопротивления порядка десятков мегаом и более можно измерять, включая резистор с таким сопротивлением последовательно с микроамперметром к источнику тока на $100 \div 300$ В. Например, если источник имеет 200 В и микроамперметр на 100 мкА показал ток 8 мкА, то сопротивление $R_x = 200 / (8 \cdot 10^{-6}) = 25 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 25 \text{ МОм}$.

Чтобы случайно не сжечь микроамперметр, последовательно включают предохранительный резистор, сопротив-

ление которого равно напряжению источника, деленному на ток, соответствующий полному отклонению стрелки прибора. В приведенном примере оно равно: $R = 200 / (0,1 \cdot 10^{-3}) = 2 \text{ МОм}$, и тогда истинное значение R_x при токе 8 мкА равно 23 МОм.

Поскольку основной частью омметра является магнитоэлектрический прибор, то он может быть использован также для измерения тока и напряжения. Поэтому большое распространение в практике получили универсальные приборы для измерения токов, напряжений и сопротивлений. Они имеют микроамперметр, к которому с помощью

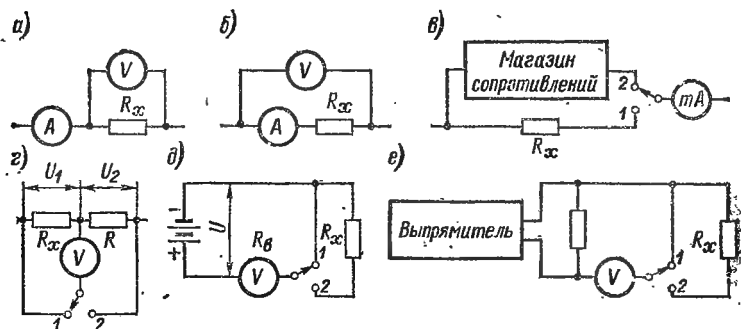


Рис. 140. Схемы для измерения сопротивлений различными методами: а, б — метод вольтметра и амперметра; в — метод замещения; г, е — метод вольтметра

переключателя могут быть присоединены различные шунты или добавочные резисторы. При измерении сопротивлений подключаются батарейка и переменный резистор для установки на нуль. Такие приборы сочетают в себе амперметр, вольтметр и омметр и их называют *ампервольт-омметрами*. Обычно в них также имеются диоды, включая которые можно измерять переменные токи и напряжения.

Рассмотрим некоторые другие методы измерения сопротивлений.

Метод вольтметра и амперметра (рис. 140, а и б) требует применения двух приборов. Сопротивление определяется по закону Ома. Схема на рис. 140, а используется для измерения сопротивлений, во много раз меньших, чем сопротивление вольтметра, а схема на рис. 140, б — для измерения сопротивлений, значительно больших, чем сопротивление амперметра. Можно пользоваться только

одним амперметром, если напряжение источника тока известно и его внутреннее сопротивление невелико.

Метод замещения (рис. 140, в) состоит в том, что гальванометр, миллиамперметр или вольтметр поочередно включают последовательно с измеряемым резистором R_x и с магазином сопротивлений. Магазин сопротивлений представляет набор нескольких резисторов (например, на 1, 2, 5, 10, 20, 50 Ом), которые можно включать последовательно в различных комбинациях. Значение R_x определяют, подбирая на магазине сопротивление, при котором отклонение стрелки прибора такое же, как и при подключении R_x . Этот метод дает большую точность измерений и не требует точно отградуированного прибора.

Метод сравнения (рис. 140, г). Резистор с измеряемым сопротивлением R_x включают последовательно с резистором, имеющим известное сопротивление R и с помощью вольтметра, сопротивление которого значительно больше, чем R_x и R , измеряют напряжения на R и R_x , т. е. U_1 и U_2 . Значение R_x подсчитывают по формуле:

$$R_x = RU_1/U_2.$$

Чем ближе друг к другу значения R_x и R , тем точнее результат измерения.

Метод вольтметра (рис. 140, д) является наиболее простым, хотя и менее точным. Нужен только один вольтметр с известным сопротивлением R_v . Если оно неизвестно, то его заранее измеряют. Иногда на шкале вольтметра бывает указан ток, потребляемый при полном отклонении стрелки. Тогда можно найти R_v , разделив напряжение, соответствующее этому отклонению, на ток.

Сначала вольтметром измеряют напряжение на зажимах источника U_1 , а затем последовательно с вольтметром включают резистор с измеряемым сопротивлением R_x . При этом вольтметр покажет напряжение U_2 меньшее, чем U_1 . Значение R_x определяют по формуле

$$R_x = R_v [(U_1/U_2) - 1].$$

Наибольшая точность измерений будет в том случае, когда $R_x = R_v$. Этот метод следует применять для измерения сопротивлений, равных $(0,1 \div 10) R_v$. Источник тока должен иметь малое внутреннее сопротивление, чтобы напряжение U_1 при изменении сопротивления цепи оставалось практически постоянным. Если источник взят со значительным внутренним сопротивлением (например,

выпрямитель), то его нагружают на резистор, сопротивление которого много меньше, чем R_B (рис. 140, е). Тогда изменение сопротивления цепи вольтметра не будет заметно изменять напряжение на зажимах источника.

Метод моста. На рис. 141, а и б показаны схемы мостов для измерения сопротивлений. Измерение методом моста

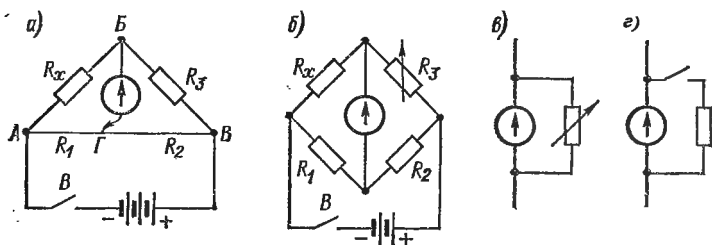


Рис. 141. Схемы мостов для измерения сопротивлений

основано на том, что при равновесии моста, т. е. при отсутствии тока в его диагонали $BГ$, сопротивления плеч моста находятся в следующем соотношении:

$$R_x R_2 = R_1 R_3.$$

Иначе говоря, при равновесии или балансе моста произведения сопротивлений противолежащих плеч равны. Из этого соотношения следует:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2.$$

Условие равновесия моста можно получить следующим путем. Пусть в диагонали $BГ$ тока нет и в ветви $ABГ$ (через резисторы R_x и R_3) протекает ток I , а в ветви AGB (через резисторы R_1 и R_2) — ток I_1 . Отсутствие тока в диагонали означает, что разность потенциалов между точками B и $Г$ равна нулю, т. е. потенциалы точек B и $Г$ равны. Но тогда равны друг другу падения напряжений на резисторах R_x и R_1 , а также на резисторах R_3 и R_2 . Напишем эти равенства:

$$IR_x = I_1 R_1 \text{ и } IR_3 = I_1 R_2.$$

Разделив одно равенство на другое, получим

$$R_x / R_3 = R_1 / R_2 \text{ или } R_x R_2 = R_1 R_3.$$

В схеме на рис. 141, а в качестве резистора R_3 включается тот или иной эталонный (известный) резистор, а резисторы R_1 и R_2 представляют собой тонкую реостатную проволоку, натянутую по прямой линии или по окружности. Иногда резисторы R_1 и R_2 выполняются в виде потенциометра. Чтобы уравновесить мост, с помощью подвижного контакта изменяют отношение R_1 и R_2 .

Возможен и другой вариант моста, показанный на рис. 141, б. В этом случае R_1 и R_2 — эталонные резисторы, отношение сопротивлений которых можно устанавливать равным 100 : 1, 10 : 1, 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100 и т. д., а R_3 — переменный резистор, регулировкой которого уравнивают мост.

Мост на рис. 141, а дает достаточно точные результаты измерения, если отношение $R_1 : R_2$ равно 0,1 ÷ 10. Наибольшая точность измерений соответствует $R_1 : R_2 = 1$. Для получения более точных результатов желательно, чтобы все плечи моста имели примерно одинаковые сопротивления.

Если мост питается постоянным током, то в качестве индикатора, включаемого в диагональ, применяется гальванометр с нулем посередине шкалы. Так как в начале измерений мост может быть сильно разбалансирован, следует уменьшить чувствительность гальванометра, чтобы он не перегорел от большого тока. Для этой цепи гальванометр шунтируют переменным резистором или постоянным резистором с выключателем (рис. 141, в и г). Когда равновесие моста с зашунтированным гальванометром приближенно найдено, шунт выключают, т. е. увеличивают чувствительность гальванометра, более точно устанавливают равновесие.

Иногда мост питают переменным током с частотой в сотни герц, а в качестве индикатора применяют телефон. Равновесие моста соответствует исчезновению или минимуму звука в телефоне. Телефоном можно пользоваться и при питании моста постоянным током, тогда равновесие моста определяют по исчезновению или наиболее слабому звуку щелчков в телефоне при замыкании и размыкании цепи источника питания.

Пробники. Для грубой проверки сопротивления различных деталей и цепей пользуются пробниками. На рис. 142 показано несколько вариантов их устройства. Проводники а и б присоединяются к проверяемой цепи. Пробник с лампочкой требует неразряженных элементов и пригоден

для проверки цепей, имеющих сопротивление, не превышающее во много раз сопротивление лампочки. Другие пробники могут работать со значительно разряженными элементами.

Пробники с вольтметром и миллиамперметром примерно равноценны. Резистор R , включенный последовательно

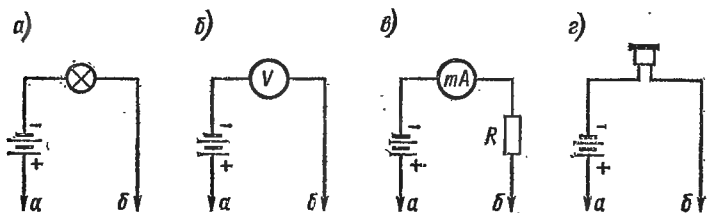


Рис. 142. Различные схемы пробников: a — с лампочкой; $б$ — с вольтметром; $в$ — с миллиамперметром; $г$ — с телефоном

с миллиамперметром, подбирается так, чтобы при замыкании накоротко проводов a и $б$ прибор давал полное отклонение. Зная R , можно по отклонению стрелки приблизительно судить о сопротивлении проверяемой цепи, т. е. применять такой пробник в качестве простейшего омметра. Если напряжение батарейки пробника невелико, то им нельзя проверять цепи с большим сопротивлением. Например, если напряжение батарейки 4 В, а миллиамперметр взят на 10 мА с добавочным резистором, имеющим сопротивление $R = 4 : 0,01 = 400$ Ом, то при проверке цепи с сопротивлением 1 МОм ток равен $4 : 1\,000\,000 = 4 \cdot 10^{-6}$ А или 4 мкА. Конечно, стрелка миллиамперметра при этом токе останется на нуле.

Наиболее чувствителен пробник с телефоном, работающий при токах, равных долям микроампера. Присоединяя его к цепи с сопротивлением даже в несколько мегаом, мы услышим в телефоне щелчок при замыкании и размыкании. Это означает, что цепь не имеет обрыва для постоянного тока. По громкости щелчка можно грубо судить о порядке сопротивления цепи. Если для постоянного тока цепь не имеет проводимости, то слабый щелчок обычно получается только при замыкании из-за наличия в цепи емкости. Например, если проверяется обмотка трансформатора и слабый щелчок слышен в момент замыкания, а при размыкании его нет, то обмотка имеет обрыв. Две

части такой обмотки образуют конденсатор, при заряде которого проходит некоторый ток в момент замыкания. Такое же явление наблюдается при проверке отсутствия замыкания обмотки с сердечником. При проверке конденсатора щелчок при замыкании и отсутствие щелчка в момент размыкания показывают, что конденсатор исправен (не пробит и не имеет значительной утечки). У исправного конденсатора щелчок при замыкании получается тем громче, чем больше емкость. Подобно этому, пробник с измерительным прибором при испытании исправного конденсатора дает отклонения стрелки в момент замыкания, а затем стрелка становится на нуль. Однако при небольшой емкости конденсатора зарядный ток имеет малое значение, и пробник с измерительным прибором оказывается недостаточно чувствительным.

Утечка в диэлектрике конденсатора может быть определена по времени, в течение которого конденсатор держит заряд. Конденсатор заряжают от источника тока и сразу же разряжают его на вольтметр или на телефон. Затем снова заряжают конденсатор и разряжают через несколько десятков секунд. Чем больше утечка, тем меньше отклонится стрелка или тем слабее будет щелчок в телефоне. Конденсаторы небольшой емкости следует испытывать на разряд. Электролитические конденсаторы, имеющие сравнительно большую утечку, испытывают на разряд через несколько секунд.

При измерении сопротивлений или проверке деталей в той или иной схеме надо проследить влияние других деталей и при необходимости отсоединить их. Например, нельзя проверять на пробой или утечку конденсатор, если он шунтирован резистором. Проверять резистор в схеме можно только в случае, если он не шунтирован другими резисторами или если шунтирующие резисторы имеют сопротивления во много раз больше проверяемого. Разумеется, что при проверке деталей или измерении сопротивлений в схеме источника питания данной схемы должны быть отсоединены.

* * *

Рассмотренные в этой небольшой книге основы электротехники, конечно, не исчерпывают все, что относится к электрическим и магнитным цепям. Изложены лишь те главные вопросы, которые надо особенно хорошо усвоить для последующего изучения радиоэлектроники. Зная ос-

новы электротехники, читатель сможет по литературе самостоятельно разобраться и в других особенностях электрических и магнитных цепей, если они ему встретятся. В многочисленных учебниках и учебных пособиях по электротехнике можно найти более углубленное рассмотрение ряда вопросов, а также дополнительный материал, который вообще бы не был изложен в данной книге.

При дальнейшем изучении электрических и магнитных цепей следует стараться увязывать теорию с практикой. Очень полезно, например, закреплять свои знания по теории решением различных практических задач по расчету цепей. Сочетание теории и практики всегда способствует лучшему усвоению материала. Автор желает всем читателям этой книги большого успеха в изучении электротехники, играющей важнейшую роль в научно-техническом прогрессе.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Основные понятия	4
1. Электроны, ионы и электрические заряды	—
2. Электрическое поле	5
3. Электрический потенциал	6
4. Электрический ток. Проводники, полупроводники и диэлектрики	7
5. Сила тока и измерение тока	9
6. Электрическое напряжение и его измерение	10
7. Электродвижущая сила	12
8. Химические источники ЭДС	—
Глава вторая. Электрические цепи постоянного тока	14
9. Электрическая цепь	—
10. Электрическое сопротивление	16
11. Расчет сопротивлений	18
12. Закон Ома для участка цепи	20
13. Последовательная электрическая цепь	24
14. Закон Ома для всей цепи	25
15. Основные режимы работы источников ЭДС	28
16. Параллельная электрическая цепь	31
17. Смешанное соединение и сложные электрические цепи	35
18. Мощность и работа тока	38
19. Эквивалентный генератор тока	43
20. Тепловое действие тока	44
21. Резисторы, реостаты и делители напряжения	48

22. Расчет реостатов, потенциометров и делителей напряжения	56
---	----

Глава третья. Электромагнитные явления и магнитные цепи	59
--	-----------

23. Магнитное поле и его свойства	—
24. Магнитная индукция, напряженность магнитного поля и магнитный поток	62
25. Магнитные свойства различных веществ	65
26. Постоянные магниты и электромагниты	71
27. Проводник с током в магнитном поле	79
28. Электромагнитная индукция	81

Глава четвертая. Электрические цепи переменного тока	85
---	-----------

29. Понятие о переменном токе	—
30. Период и частота переменного тока	89
31. Математическое выражение переменного тока	90
32. Пульсирующий ток	92
33. Сдвиг фаз у переменных токов	97
34. Сложные переменные токи	99
35. Векторные диаграммы	101
36. Явление самоиндукции	103
37. Индуктивное и активное сопротивления	108
38. Поверхностный эффект	113
39. Мощность и потери энергии в цепи переменного тока	115
40. Полное сопротивление цепей переменного тока	119
41. Катушки индуктивности	122
42. Простейший расчет высокочастотных катушек	126
43. Трансформаторы и автотрансформаторы	128
44. Простейший расчет силовых трансформаторов и автотрансформаторов	136
45. Конденсаторы	139
46. Заряд и разряд конденсатора	145
47. Конденсатор в цепи переменного тока. Емкостное сопротивление	150
48. Конденсаторы, применяемые в радиоэлектронике	156
49. Цепь с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением	162

Глава пятая. Выпрямители	165
---	------------

50. Общие сведения	—
51. Основные схемы выпрямителей	166
52. Сглаживающие фильтры	171
53. Выпрямители с умножением напряжения	181
54. Детали выпрямителей	182

Глава шестая. Электроизмерительные приборы	185
---	------------

55. Общие сведения об электроизмерительных приборах	—
56. Амперметры и вольтметры	187
57. Основные системы электроизмерительных приборов	194
58. Приборы электродинамической и индукционной системы	202
59. Измерение сопротивлений	206

Иван Петрович Жеребцов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

{Основы электротехники}

Редактор *С. П. Левкович*

Художественный редактор *Д. Р. Стеванович*

Технический редактор *А. Г. Рябкина*

Корректор *А. Н. Акимов*

ИБ № 1878

Сдано в набор 09.04.82. Подписано в печать 04.10.82.
М-49152. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2.
Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л.
11,34. Усл. кр.-отт. 11,72. Уч.-изд. л. 13,2. Ти-
раж 150 000 экз. Заказ 282. Цена 95 к.

Ленинградское отделение Энергоиздата. 191041, Ленин-
град, Марсово поле, 1

Набрано и сматрицировано в ордена Октябрьской Ре-
волюции, ордена Трудового Красного Знамени Ленин-
градском производственно-техническом объединении
«Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграф-
прома при Государственном комитете СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136,
Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

Отпечатано во Владимирской типографии «Союзполи-
графпрома» при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торгов-
ли. 600000, г. Владимир, Октябрьский пр., 7.